

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA
MAXIMIZAR LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LAS PLANTAS EN GRANJAS
VERTICALES POR MEDIO DE LUZ ARTIFICIAL

YESID FERNANDO RAMOS GONZALIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2015

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA
MAXIMIZAR LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LAS PLANTAS EN GRANJAS
VERTICALES POR MEDIO DE LUZ ARTIFICIAL

YESID FERNANDO RAMOS GONZALIAS

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones

Director
ING. HUGO ANDRÉS MACÍAS FERRO
Ingeniero Electrónico Universidad Autónoma de Occidente
Master of Science in Electrical Engineer of University of Puerto Rico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2015

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Industrial

Ing. Diego Martínez

Jurado

Ing. Faruk Fonthal

Jurado

Santiago de Cali, 13 de octubre de 2015

Para mi familia, mi padre, José Fernando Ramos Gonzalias, mi madre, Ana Hilia Gonzalias, mi hermana, Yessica Fernanda Ramos y para Coffee, nuestra mascota.

AGRADECIMIENTOS

Si hoy termino una etapa más del ciclo de vida, sin lugar a dudas, es gracias a mis padres, y aunque mi madre, Ana Hilia Gonzalias es y ha sido la motivadora durante mi vida, esta etapa académica y profesional se la debo en parte a mi padre, José Fernando Ramos. Él hace mucho tiempo con sus conocimientos básicos en electrónica, reparo e implemento diversos sistemas que para la fecha, me eran desconocidos e indiferentes. Sin embargo en un Diciembre, indirectamente despertó mi interés por las luces (Iluminación) y la electrónica en general, por medio de un conjunto de bombillos incandescentes de colores que formaban una estrella, hecha por él, capaz de conmutar (parpadear) a diferentes frecuencias.

Por este hecho, doy gracias a mi padre, por despertar este interés y por haber contribuido con este triunfo, ya que no solo fue la chispa, sino un apoyo constante junto con mi madre.

A todas las personas que conocí durante este periodo formativo que incluye formación técnica en el SENA, tecnológica en UNIVALLE y profesional en la UAO, gracias, por que sin ellos, este triunfo tampoco habría sido posible.

A instituciones como el Tecnoparque SENA – Nodo Cali, Coilcraft, Texas Instruments y Analog Device por dotarme de elementos y equipos para la realización de este proyecto.

Al CityFarm MIT (Massachusetts Institute of Technology) por abrir las puertas del conocimiento a todos los interesados.

A los diferentes docentes, que brindaron su conocimiento y experiencia para contribuir en mi formación.

A varios Ingenieros de la UAO, pero en especial a Andrés Macías y Yuri U. López, por hacer de la investigación un hábito en mí.

Al departamento de bienestar universitario por apoyar mí crecimiento como persona.

A la UAO por permitirme reencontrar amistades de niñez y haber construido otras.

A la vida y por último, pero no menos importante, sino el más, a DIOS. Ese ser que permitió que cada una de las personas mencionadas o referenciadas hayan aportado para la culminación de esta gran obra.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	16
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVO ESPECIFICOS	19
2 TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGIA LUMINICA EN QUIMICA	20
2.1 FASE LUMINOSA	21
2.2 FASE OSCURA	23
2.3 LA ESTRUCTURA	24
2.4 LA CLOROFILA	25
2.5 FIJACIÓN DEL CARBONO – C3, C4 Y CAM	27
2.6 DIFICULTADES DEBIDO AL AMBIENTE	29
3 CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS EN GRANJAS VERTICALES	30
3.1 TÉCNICAS PARA EL CRECIMIENTO DE PLANTAS COMESTIBLES EN GRANJAS VERTICALES	32
3.2 ELEMENTOS BASICOS	34
4 VARIABLES Y PARAMETROS PARA LA ADMINISTRACIÓN NUTRICIONAL	38
4.1 NIVEL DE PH	38
4.2 TEMPERATURA	40
4.2.1 Temperatura agua.	40
4.2.2 Temperatura Solución Nutricional.	40
4.2.3 Temperatura Plantas.	40
4.3 ELECTROCONDUCTIVIDAD	41
4.3.1 Unidades de Electroconductividad.	41
4.3.2 Limitaciones de EC.	42
4.4 LUZ	42

4.4.1 Cantidad de luz.	43
4.4.2 Intensidad de luz.	43
4.4.3 Daily light integral (DLI).	43
4.4.4 Calidad de luz – Distribución espectral.	43
4.4.5 Duración de luz.	44
4.5 HUMEDAD	44
4.5.1 Humedad Relativa (RH).	44
 5 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE GRANJA VERTICAL	 45
5.1 DISEÑO	46
5.2 SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA	47
5.3 CONTROL ELECTRÓNICO	48
5.4 HIDROPONIA	48
5.5 LUCES DE CRECIMIENTO	49
5.5.1 Lámparas incandescentes	49
5.5.2 Lámparas de vapor de mercurio (MV)	49
5.5.3 Lámparas mixtas (incandescentes y de vapor de mercurio)	50
5.5.4 Lámparas fluorescentes	50
5.5.5 Lámparas de halogenuros metálicos (MH)	50
5.5.6 Lámparas de alta presión de sodio o (HPS)	50
5.5.7 Lámparas LEDs	51
 6 EMULACIÓN SOLAR	 52
6.1 LUZ SOLAR	54
6.2 LUZ ARTIFICIAL LED	56
 7 DESARROLLO SISTEMA DE CONTROL Y VALIDACIÓN	 64
7.1 CONTROLADOR NIVEL PH	68
7.2 CONTROLADOR INTENSIDAD DE LUZ	74
7.3 CONTROLADOR TEMPERATURA y HUMEDAD	78
8 CONCLUSIONES	98
 BIBLIOGRAFIA	 104

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fases de la fotosíntesis	21
Figura 2. Proceso fotosintético	22
Figura 3. Estructura de los cloroplastos	24
Figura 4. Espectro de acción par típica, espectros de absorción de la clorofila-a y clorofila-b	25
Figura 5 iluminación característica entre 400 y 700 nm	26
Figura 6. Modelo de granja vertical	30
Figura 7. Superficie cultivable multiplicada - horizontal vs vertical	31
Figura 8. Elementos de un típico sistema hidropónico por irrigación	33
Figura 9. Elementos de un típico sistema hidropónico por flujo	35
Figura 10. Ilustración de un sistema aeropónico – nasa	36
Figura 11. Elementos de un sistema aeropónico	36
Figura 12. La escala del ph	38
Figura 13. Sistemas que integran una granja vertical	45
Figura 14. Modelos de granja vertical	46
Figura 15. A) instalación bases, b) estructura granja construida	52
Figura 16. A) base para cultivo, b) sistema solar	52
Figura 17. Zona de cultivo vertical construida	52
Figura 18. Distribución de la energía solar	54
Figura 19. Espectro radiación solar	55
Figura 20. Intensidad de luz solar	55

Figura 21. Configuración panel led	58
Figura 22. Ensamblaje pcb led	58
Figura 23. Prueba pcb led	58
Figura 26. Convertidor boost a lazo abierto	59
Figura 27. Convertidor boost a lazo cerrado	59
Figura 28. Circuito de amplificación y conmutación	60
Figura 29. Señal emulación solar esperada	61
Figura 30. señal emulación solar generada y captada con osciloscopio, a) ciclo útil del 25%, b) 80%	62
Figura 31. Señal emulación solar captada con luxómetro	63
Figura 32. Equipos e instrumentos necesarios para las pruebas	64
Figura 33. Luxómetro registrando medición	64
Figura 34. Equipo en funcionamiento	64
Figura 35. Microcontrolador de uso	67
Figura 36. Descripción grafica del sistema diseñado	67
Figura 37. Disponibilidad de nutrientes	69
Figura 38. Control carga en ac	70
Figura 39. Lazo de control ph	71
Figura 40. Sensor de ph	71
Figura 41. Respuesta sensor de ph	72
Figura 42. Actuador del sistema de control – bomba sumergible	73
Figura 43. Código en c, compilador ccs	73
Figura 44. Monitoreo variable nivel ph	74

Figura 45. Media onda sinusoidal referencia de control	75
Figura 46. Lazo de control intensidad de luz	75
Figura 47. Sensor de intensidad de luz	76
Figura 48. Respuesta a lazo abierto del sistema de iluminación	76
Figura 49. Ubicación sensor de luz frente a plantas	77
Figura 50. Sensor de temperatura	79
Figura 51. Mensajes de falla, censado de temperatura, a) sensor 2 falló, b) varios sensores presentan falla	79
Figura 52. Actuador para el control de la temperatura	80
Figura 53. Lazo de control temperatura	81
Figura 54. Esquema del controlador fuzzy – temperatura	81
Figura 55. Función de pertenencia – error temperatura	83
Figura 56. Función de pertenencia – derivada error temperatura	83
Figura 57. Función de pertenencia – salida temperatura	83
Figura 58. Respuesta frente al error de la temperatura como entrada	85
Figura 59. Respuesta frente a la derivada del error de la temperatura como entrada	86
Figura 60. Respuesta relación de entradas controlador de temperatura	86
Figura 61. Grafica de validación del control acción temperatura, a) día 1, b) día 2	87
Figura 62. Sensor de humedad	88
Figura 63. Respuesta sensor de humedad	88
Figura 64. Lazo de control humedad	89
Figura 65. Esquema del controlador fuzzy – humedad	90

Figura 66. Función de pertenencia – error humedad	91
Figura 67. Función de pertenencia – derivada error humedad	91
Figura 68. Función de pertenencia – salida humedad	91
Figura 69. Respuesta frente al error de la humedad como entrada	93
Figura 70. Respuesta frente a la derivada del error de la temperatura como entrada	94
Figura 71. Respuesta relación de entradas controlador de humedad	94
Figura 72. Grafica de validación del control acción humedad, a) día 1 y b) día 2)	95
Figura 73. Implementación y operación de la granja vertical	97

LISTA DE TABLAS

	PÁG.
Tabla 1. Absorción de longitudes de onda para los pigmentos foto sensitivos	56
Tabla 2. Cuadro de selección led	57
Tabla 3. Matriz de relación controlador de temperatura.	84
Tabla 4. Look up table controlador de temperatura.	85
Tabla 5.matriz de relación controlador de humedad.	92
Tabla 6. Look up table matriz de relación controlador de humedad.	93

LISTA DE ANEXOS

	PÁG.
Anexo A: microcontrolador dspic30f4011	104
Anexo B: sensor de intensidad de luz opt101	105
Anexo C: sensor de humedad	106
Anexo D: sensor de temperatura	107
Anexo E: sensor de ph	108
Anexo F: led rojo	109
Anexo G: led azul	110
Anexo H: controlador de tensión	111
Anexo I: inductancias	112
Anexo J: mosfet	113
Anexo K: transistor darlington	114
Anexo L: tarjeta botones y lcd	115
Anexo M: tarjeta sensores	116
Anexo N: tarjeta fuente controlada	117
Anexo N: tarjeta cpu	118
Anexo P: tarjeta panel led	119
Anexo Q: tarjeta cargas en ac	120

GLOSARIO

ÁCIDO DE LAS CRASULÁCEAS: es un metabolismo especial de diferentes tipos de plantas. Mientras que la mayoría de las plantas absorben y fijan el dióxido de carbono durante el día, en las plantas CAM las dos están separadas en cuanto al tiempo.

ACUAPONIA: es el sistema sustentable de producción de plantas y peces que combina la acuicultura tradicional, que es la cría de animales acuáticos como el pescado con la hidroponía (cultivo de plantas en agua) en un medioambiente simbiótico.

AEROPONIA: aeroponía es el proceso de cultivar plantas en un entorno aéreo o de niebla sin hacer uso de suelo.

ANABOLISMO AUTÓTROFO: el anabolismo es la vía constructiva del metabolismo, es decir, la ruta de síntesis de moléculas complejas a partir de moléculas sencillas. El anabolismo autótrofo se puede realizar mediante fotosíntesis.

CIANOBACTERIAS: división a la que pertenecen los organismos procariotas unicelulares fotosintéticos que carecen de núcleo definido u otras estructuras celulares especializadas.

CLOROPLASTOS: son los orgánulos celulares que en los organismos eucariontes fotosintetizadores se ocupan de la fotosíntesis.

ELECTRONES: comúnmente representado por el símbolo: e^- , es una partícula subatómica con una carga eléctrica elemental negativa, generalmente se define como una partícula elemental.

ESTROMAS: masa de micelio compuesta de hifas estrechamente entrelazadas.

FOTONES: es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético.

IONES: un ion es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.

PROTONES: es una partícula subatómica con una carga eléctrica elemental positiva 1. Igual en valor absoluto y de signo contrario a la del electrón.

SEDUMS: son plantas muy adaptadas a la sequía, debido a la capacidad de almacenar agua en sus hojas carnosas.

VACUOLAS: es un orgánulo celular presente en todas las células de plantas y hongos. También aparece en algunas células protistas y de otros eucariotas.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de control con diferentes estrategias aplicadas a un prototipo de granja vertical, donde la toma de decisiones y la ejecución de acciones permiten el buen comportamiento de las variables que intervienen en el desarrollo vegetativo de las plantas al interior de la granja construida, tales como: Temperatura, humedad, intensidad de luz y pH de la solución nutricional.

También se presenta de manera experimental el desarrollo de un sistema de iluminación capaz de emular el comportamiento solar por medio de iluminación artificial LED. Este sistema de iluminación es capaz de emular el comportamiento (forma de onda, media onda sinusoidal) solar día por medio del controlador desarrollado con el objetivo de maximizar la capacidad productiva de las plantas, es decir acelerar el crecimiento con menos recursos.

Con base en previas investigaciones es importante resaltar que este tipo de implementaciones localmente no son frecuentes.

Palabras claves: Iluminación LED, control, granja vertical, ahorro energético.

INTRODUCCIÓN

Los mercados de todo el mundo están preparados para lograr un importante crecimiento en la oferta de alimentos que comienza a adoptar un proceso automatizado. “La agricultura vertical es un entorno cerrado en el que las plantas crecen bajo iluminación artificial y de estantes apilada una sobre otra. Todos los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas son controlados, un proceso que elimina las influencias perjudiciales como la de los plaguicidas y las malas condiciones climáticas”¹.

Una granja vertical se ejecuta basada en la ciencia y la ingeniería. La primera es utilizada para producir las plantas cuidadosamente y la segunda para controlar entre otras variables de gran importancia, la luz que reciben las plantas para su crecimiento. Está permite el cultivo de hortalizas en interiores durante todo el año. “Es un sistema que crea artificialmente el ambiente necesario para que las plantas crezcan controlando la cantidad de solución nutricional, aire y la luz por medio de diodos emisores de luz, LED (Light Emitting Diode) para el desarrollo de la fotosíntesis, porque la cantidad de luz, temperatura, humedad y los niveles de concentración de las emisiones de dióxido de carbono, pueden ser mejoradas sin ser afectados por las condiciones meteorológicas”².

El propósito es poder recrear buenas condiciones climáticas, al interior de un prototipo de granja vertical, donde un controlador toma las acciones necesarias para garantizarlo, así las plantas sin importar las condiciones externas a la granja se desarrollan día tras día con el menor consumo energético posible. Para esto se cuenta con un sistema solar, capaz de dotar de energía eléctrica a los sistemas electrónicos y un sistema de almacenamiento de aguas lluvias, útil para la alimentación de las plantas y control de algunas variables.

¹ Plant Factory / Vertical Farming Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2014-2020. [en línea] Kent: Report Buyer, 2014 [consultado el 4 de mayo de 2015] Disponible en internet: <https://www.reportbuyer.com/product/2107872/plant-factory-vertical-farming-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-2014-2020.html>

² Ibíd., Disponible en internet: <https://www.reportbuyer.com/product/2107872/plant-factory-vertical-farming-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-2014-2020.html>

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar de un sistema de control para maximizar el proceso de fotosíntesis y capacidad productiva de plantas comestibles en un prototipo de granja vertical, emulando la luz solar usando iluminación artificial LED.

1.2 OBJETIVO ESPECIFICOS

- Estudiar el proceso de fotosíntesis y crecimiento de plantas comestibles en granjas verticales.
- Definir las variables y parámetros que intervienen en el proceso de fotosíntesis y crecimiento de plantas comestibles en una granja vertical.
- Diseñar y construir un prototipo de granja vertical que permita desarrollar el proceso de fotosíntesis y crecimiento de plantas comestibles seleccionadas.
- Diseñar e implementar un sistema de control que incluya las variables de interés que intervienen en el proceso de fotosíntesis y crecimiento de plantas comestibles seleccionadas en el prototipo de granja vertical construido.
- Emular para el prototipo de granja vertical el efecto de la luz solar en el proceso de fotosíntesis mediante iluminación LED.
- Validar el funcionamiento del sistema de control diseñado en la granja vertical construida.
- Generar un reporte final y la documentación necesaria del trabajo desarrollado.

2 TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA LUMÍNICA EN QUÍMICA

“Llamada en un principio función clorofílica, constituye la relación base del anabolismo autótrofo, mediante el cual los organismos vivos transforman la energía del sol en energía química que almacenan en forma de adenosín trifosfato, ATP (Adenosine triphosphate)”³.

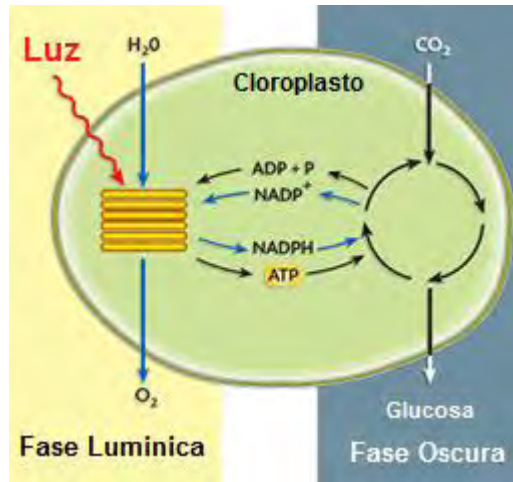
Esta, “la fotosíntesis es el proceso físico - químico por el cual las plantas, algas y bacterias fotosintéticas utilizan energía lumínica para conducir la síntesis de compuestos orgánicos, es decir convierten el dióxido de carbono (CO₂) y el agua (H₂O), en carbohidratos usando la energía de la luz solar”⁴. De muchas maneras, la fotosíntesis es la inversa de la respiración: cuando los animales respiran, se usa oxígeno (O₂) se queman los carbohidratos, liberando CO₂ y produciendo la energía que se necesita para vivir.

La fotosíntesis consiste en una compleja serie de reacciones, donde se reconocen dos fases sucesivas: una dependiente de la luz o reacciones luminosas (fase luminosa) y otra que no depende de ella, reacciones oscuras (fase oscura). Dentro de estas dos fases se despliegan cuatro etapas clave: *absorción de la luz, separación de carga eléctrica, fijación de carbono y evolución del oxígeno*, como se puede observar en la figura 1.

³ CAMACHO, Jairo. Gran Consultor Educar Enciclopedia Estudiantil. Bogotá: Educar Cultural y Recreativa, 1999. p. 667.

⁴ BROTSUDARMOA, Tatas et al. The Light Reactions of Photosynthesis as a Paradigm for Solar Fuel Production. [en línea]. En: Energy Procedia, 2014, vol. 47. p. 284 [consultado el 10 de octubre 2014]. Disponible en internet: http://ac.els-cdn.com/S1876610214002422/1-s2.0-S1876610214002422-main.pdf?_tid=92d8142e-773f-11e5-844f-00000aabb0f02&acdnat=1445355243_6c860114b50496331129732a4a00d515

Figura 1. Fases de la fotosíntesis



Fuente: The dark stage (calvin cycle) [en línea]. [Consultado el 6 de octubre 2014]. Disponible en internet: <http://leavingbio.net/photosynthesis.htm#DARK>

2.1 FASE LUMINOSA

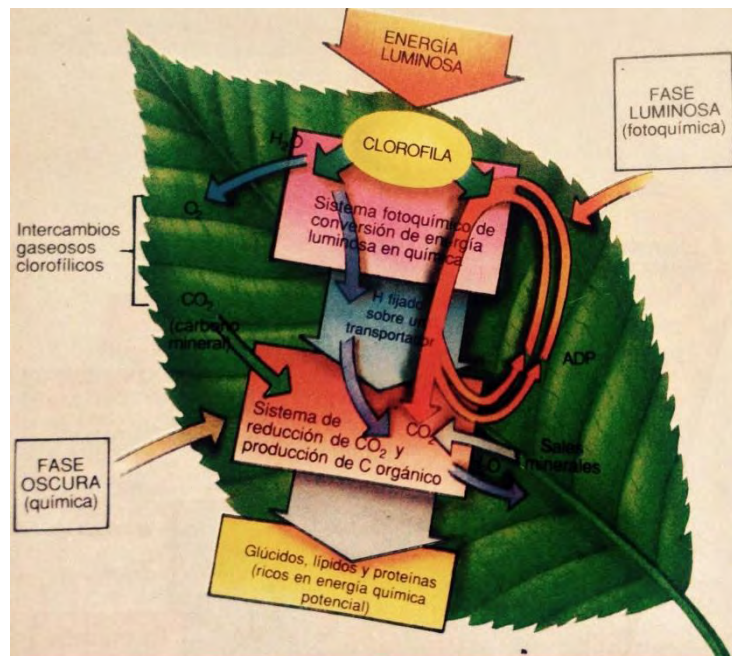
“En la fase luminosa o fotofosforilización, se presenta un *efecto fotoeléctrico* donde la luz que incide (fotones) es absorbida por la clorofila a la que se excita, provocando que ésta libere electrones cargándose así positivamente (Etapa absorción). Por cada fotón de luz se libera un electrón. Simultáneamente los fotones provocan la ruptura de la molécula de agua (proceso conocido como fotólisis) en dos subproductos, oxígeno que se libera al medio, y protones (H^+)”⁵. En la figura 2 se observa el proceso mencionado gráficamente.

“Todos los componentes de las reacciones de la luz están dispuestos sobre las proteínas en las membranas tilacoides. Cosecha de antena, por ejemplo, son proteínas que contienen clorofila, pigmentos para absorber la luz y pasar la energía a centros de reacción cercanos”⁶.

⁵ CAMACHO, Op. cit., p. 667

⁶ COGDELL, Richard. Photosynthesis. [en línea]. En: New Scientist, 2013, Vol. 217. p. 8 [consultado el 10 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?vid=1&sid=faad5080-95c0-4240-a243-ca2a1174a1b9%40sessionmgr110&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=85284866&db=aph>

Figura 2. Proceso fotosintético



Fuente: CAMACHO, Jairo. Gran Consultor Educar Enciclopedia Estudiantil. Bogotá: Educar Cultural y Recreativa, 1999. p. 668.

Los electrones liberados por la clorofila activada son captados por los protones a través de unos transportadores de manera que se forma hidrogeno molecular que se utiliza para que la molécula de nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, NADP del inglés (*Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate*) se reduzca a nicotinamida adenina dinucleótido fosfato dihidrogenado, NADPH₂ del inglés (NADPH dehydrogenase) (Etapa separación de carga eléctrica).

“Posteriormente los protones se acumulan en el estroma y se comportan como enzimas activos catalizando la formación de moléculas de ATP a partir de adenina dinucleótido fosfato, ADP del inglés (*adenine dinucleotide phosphate*) y fosfato, P del inglés (phosphate) lo que permite la generación de una fuente de energía molecular para el desarrollo de la planta”⁷.

⁷ COGDELL, Op. cit., Disponible en internet:

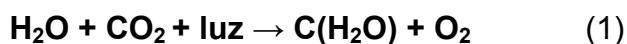
<http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?vid=1&sid=faad5080-95c0-4240-a243-ca2a1174a1b9%40sessionmgr110&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtYm90ZGZQ%3d%3d#AN=85284866&db=aph>

2.2 FASE OSCURA

“La fase oscura es indiferente a la presencia de luz y sus reacciones tienen lugar en el estroma de los cloroplastos, donde en ella se utiliza la energía química almacenada en el ATP y el poder reductor del NADPH_2 , sintetizados en la fase luminosa para realizar la fijación del CO_2 atmosférico”⁸. En las plantas, algas y ciertos tipos de bacterias, los resultados del proceso fotosintético en la liberación de oxígeno molecular y la eliminación de CO_2 de la atmósfera se utiliza para sintetizar carbohidratos (fotosíntesis oxigénica). Otros tipos de bacterias utilizan la energía luminosa para crear compuestos orgánicos, pero no producen oxígeno (anoxigénica fotosíntesis). (Etapa fijación del carbono).

Mientras tanto el centro de reacción es un "reinicio" con un nuevo electrón desprendido del H_2O . Esta sustitución viene de parte del centro de reacción complejo denominado centro evolución del oxígeno, que divide las moléculas de H_2O en los electrones, iones de hidrógeno y oxígeno.

El proceso completo se puede resumir en una sencilla ecuación, que gráficamente se vio en la figura 1. Esta se puede interpretar o leer de la siguiente manera: *Mediante la reacción de la luz más la participación de agua y dióxido de carbono se produce carbohidrato y oxígeno*, lo que reduce finalmente al proceso de la fotosíntesis.

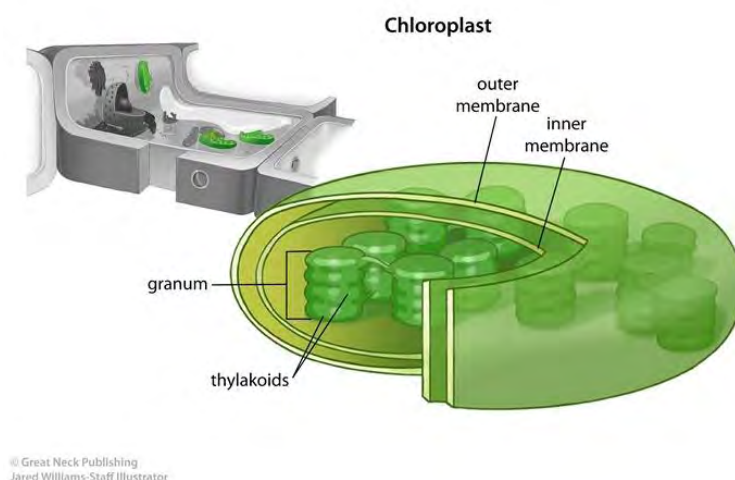


⁸ CAMACHO, Op. cit., p. 667

2.3 LA ESTRUCTURA

Toda esta química, de absorción de la luz a la síntesis de los carbohidratos, se produce en una estructura llamada cloroplasto. “Los cloroplastos poseen dos membranas. La membrana exterior lisa que contiene toda la estructura y la membrana interna que se pliega en una serie de discos apilados llamados tilacoides que contienen los pigmentos y complejos de proteínas necesarias para capturar energía solar y liberar O_2 ”⁹. Las enzimas y otros componentes involucrados en convertir el CO_2 en los azúcares se encuentran en el estroma, la cavidad llena de líquido dentro del cloroplasto. En la figura 3 se observa la estructura de los cloroplastos, la membrana externa e interna, como también los tilacoides. Una hoja de la planta puede contener 500.000 cloroplastos por milímetro cuadrado.

Figura 3. Estructura de los cloroplastos



Fuente: COGDELL, Richard. Photosynthesis. [en línea]. En: New Scientist, 2013, Vol. 217. p. 8 [consultado el 10 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?vid=1&sid=faad5080-95c0-4240-a243-ca2a1174a1b9%40sessionmgr110&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtY2ZQ%3d%3d#AN=85284866&db=aph>

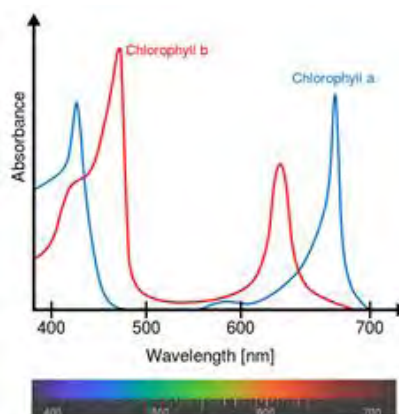
⁹ COGDELL, Op. cit., Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?vid=1&sid=faad5080-95c0-4240-a243-ca2a1174a1b9%40sessionmgr110&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtY2ZQ%3d%3d#AN=85284866&db=aph>

2.4 LA CLOROFILA

La clorofila es un pigmento verde que se encuentra en las cianobacterias y los cloroplastos de las algas y las plantas. Esta es una biomolécula extremadamente importante, crítica en la fotosíntesis, que permite a las plantas absorber la energía de la luz. La clorofila absorbe la luz más fuertemente en la parte fría (azul) del espectro electromagnético, seguido por la porción caliente (roja), es decir entre 400 y 500 nanómetros (nm) y entre 630 y 680 nm, como se puede apreciar en la siguiente figura 4. En esta figura se observa en el eje Y el nivel de absorción versus en el eje X la longitud de onda.

Los fotones emitidos por la luz solar en longitudes de onda más cortas tienden a ser tan enérgicos que pueden ser perjudiciales para las células y tejidos, pero son en su mayoría filtrados por la capa de ozono en la estratosfera. Los fotones en longitudes de onda más largas no llevan la energía suficiente para permitir que tenga lugar la fotosíntesis.

Figura 4. Espectro de acción PAR típica, espectros de absorción de la clorofila-A y clorofila-B



Fuente: Chlorophyll & other photosensitives [en línea]. United kingdom [Consultado el 11 de octubre 2014]. Disponible en internet: <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>

“La clorofila A es uno de los principales pigmentos fotosintéticos de las plantas verdes. Absorbe luz a 660 nm (color rojo), longitud de onda pico que es vital para las plantas. También tiene un segundo pico en la región azul del espectro entre 400 – 450 nm”¹⁰.

“La clorofila B es otro de los principales pigmentos fotosintéticos de las plantas verdes. También tiene dos picos de absorción pero en distintas longitudes de onda que los de clorofila A. Los picos de clorofila B se encuentran alrededor de un 640 nm (color rojo) y 425 – 475 nm (color azul)”¹¹.

El rango espectral desde 400 nm hasta 700 nm es conocido como radiación fotosintéticamente activa, a menudo abreviada PAR, por sus siglas en Ingles, la cual, los organismos fotosintéticos son capaces de utilizar en el proceso de fotosíntesis. Esta región espectral corresponde más o menos con el rango de la luz visible para el ojo humano. Es por este motivo que los sistemas de iluminación diseñados, en especial los LED, lucen como en la siguiente imagen, por emitir longitudes de onda en el rango anteriormente mencionado.

Figura 5 Iluminación característica entre 400 y 700 nm



Fuente: City Farming [en línea]. lighting philips [Consultado el 6 de Mayo de 2015]. Disponible en internet: http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/shared/assets/images/applications/horticulture/Philips-City-Farming-Lighting-1935-960x335px.jpg

¹⁰ Chlorophyll & other photosentitives [en línea]. United kingdom [Consultado el 11 octubre 2014]. Disponible en internet: <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>

¹¹ Ibíd., Disponible en internet: <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>

2.5 FIJACIÓN DEL CARBONO – C3, C4 Y CAM

Varios caminos de la fotosíntesis son utilizados por diferentes plantas como una respuesta a las diversas condiciones climáticas, principalmente temperatura y disponibilidad de agua. “Con el fin de sobrevivir a ambientes terrestres, todas las plantas deben hacer frente al déficit de agua de vez en cuando. Cuando las plantas abren sus numerosos poros microscópicos, llamados estomas, para admitir CO_2 para la fotosíntesis, corren el riesgo de perder agua a través de estas aberturas por evaporación. Las plantas, por lo tanto, a veces estrechan las estomas a fin de conservar el agua para sobrevivir”¹². El delicado equilibrio entre la conservación del H_2O y CO_2 ha dado lugar a la evolución de tres tipos principales de la fotosíntesis. Las plantas que emplean cada una de estas tres rutas diferentes no sólo muestran diferentes partes anatómicas sino que se adaptan a distintos climas.

Como anteriormente se había mencionado, el proceso de conversión de CO_2 a las moléculas orgánicas se denomina fijación del carbono. La más antigua y vía más común de fijación del carbono es la ruta 3, C3. La mayoría de los árboles y los cultivos agrícolas, como el arroz, el trigo, la soya, las papas y las verduras, usan este metabolismo. En el C3, la primera molécula orgánica formada a partir de CO_2 , phosphoglycerate (PGA), contiene tres átomos de carbono. Es parte esencial de este proceso 5 moléculas de carbono, llamada bi-fosfato de ribulosa (RuBP) que tiene una afinidad con el CO_2 .

Aunque la ribulosa 1,5-bisfosfato, RuBisCO (Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) tiene una afinidad con el CO_2 , también se une O_2 , en función de la proporción relativa de las concentraciones de CO_2 en O_2 . “Cuando los niveles de CO_2 son bajos, el O_2 comienza a dejar fuera de competencia al CO_2 en el sitio de enlace en la RuBisCO, y la tasa de fijación de carbono fotosintético disminuye. De hecho, de una forma más el O_2 es tomado por el RuBisCO, una planta empieza a producir CO_2 a través de un proceso llamado la foto respiración”¹³. Esta competencia entre CO_2 y O_2 depende de la temperatura.

¹² ZHENG, Ming. Photosynthesis. [en línea]. En: Salem Press Encyclopedia Of Science, 2015. p. 1 [Consultado el 3 de enero de 2015]. Disponible en internet:

<http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?sid=2094f9cf-a69f-4bfb-aa6c-afae8e502cf7%40sessionmgr111&vid=1&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475805&db=ers>

¹³ Ibíd., Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?sid=2094f9cf-a69f-4bfb-aa6c-afae8e502cf7%40sessionmgr111&vid=1&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475805&db=ers>

En los niveles actuales de CO₂ atmosférico, alrededor de 380 partes por millón, temperaturas superiores a los 25°C son favorables para plantas C3, porque los niveles de CO₂ están por debajo del nivel óptimo.

Otras plantas pueden transformar el CO₂ en azúcar de carbono 4 y son por lo tanto llamados plantas de carbono 4, C4. “Las plantas C4 están equipadas con una bomba de CO₂ que puede concentrar CO₂ dentro de sus hojas. Esto permite a estas plantas realizar la fotosíntesis aun cuando sus estomas están parcialmente o temporalmente cerradas a fin de conservar el agua en un caluroso y soleado día. Así, las plantas de carbono 4 están bien adaptadas a altas temperaturas durante el día, intensa luz solar y déficit de agua”¹⁴. Esta es la razón por la que la maleza de C4 a menudo esta fuera de competencia con el césped de C3 cuando el agua se convierte en un factor limitante en el verano. Otros ejemplos de plantas C4 incluyen maíz, caña de azúcar, y el sorgo.

Las plantas que emplean el tercer tipo de la fotosíntesis son adaptadas especialmente a hábitats desérticos. Debido a la escasez de agua, estas plantas no pueden permitirse el lujo de abrir sus estomas durante todo el día para no deshidratarse. “Las plantas del desierto, por lo tanto, participan en lo que se denomina metabolismo ácido de las crasuláceas, CAM del inglés (Crassulacean acid metabolism), en el que se abrirán sus estomas para admitir CO₂ por la noche, este se convertirá en ácido, y será almacenado dentro de sus vacuolas. El CO₂ almacenado en el interior de los ácidos durante el día será utilizado en la fotosíntesis”¹⁵. Las plantas CAM están bien adaptadas a las altas temperaturas diurnas, intensa luz y muy baja humedad del bioma del suelo del desierto. Algunas plantas CAM conocidas son el cactus, la piña y sedums.

¹⁴ Ibid., Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?sid=2094f9cf-a69f-4bfb-aa6c-afae8e502cf7%40sessionmgr111&vid=1&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475805&db=ers>

¹⁵ Ibid., Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?sid=2094f9cf-a69f-4bfb-aa6c-afae8e502cf7%40sessionmgr111&vid=1&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475805&db=ers>

2.6 DIFICULTADES DEBIDO AL AMBIENTE

“La respuesta de las plantas al aumento de las temperaturas es compleja, puede ser positivo o negativo, y a menudo se complica por otros factores climáticos. La humedad en el ambiente es particularmente influyente, como los cambios de temperatura pueden correlacionarse con los cambios de punto de condensación y evaporación, afectando significativamente la disponibilidad de agua”¹⁶.

Estrés por calor moderado también causa una reducción en las actividades de RuBisCO. La reacción secundaria oxigenada RuBisCO promueve la producción de peróxido de hidrogeno, H₂O₂, que puede ser tóxico para las células vegetales.

“La alta temperatura transitoria o constante provoca daños morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y cambios que reducen la fotosíntesis y por lo tanto limitan el crecimiento de la planta y la productividad. Estrés térmico moderado causa una reducción reversible de la fotosíntesis; aumento del estrés de calor provoca daños irreversibles en el aparato fotosintético, resultando en una mayor inhibición de crecimiento de las plantas”¹⁷.

“Muchos estudios tales como: *Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar*, han examinado los efectos del estrés sobre el sistema de transporte de electrones, fotosistemas, pigmentos, las actividades enzimáticas relacionadas con la fotosíntesis, el intercambio gaseoso y la fluorescencia de la clorofila en las plantas”¹⁸.

Por este motivo el diseño e implementación de un sistema de control que permita maximizar la capacidad productiva de las plantas, comprende un adecuado equilibrio entre los parámetros como la temperatura y la humedad que afectan, significativamente los procesos de fotosíntesis y por su puesto a la planta misma.

¹⁶ Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar [en línea]. Beijing, 2014. [Consultado el 15 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/14/111>

¹⁷ Ibíd., Disponible en internet: <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/14/111>

¹⁸ Ibíd., Disponible en internet: <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/14/111>

3 CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS EN GRANJAS VERTICALES

Las granjas verticales son un modelo de agricultura, es el cultivo de la vida vegetal o animal dentro de una granja ubicado en rascacielos o superficies inclinadas en sentido vertical. La idea moderna de la agricultura vertical utiliza técnicas similares a las vistas en las casas de cristal, donde la luz solar natural, se puede aumentar con la iluminación artificial o simplemente la luz natural puede ser reemplazada en su totalidad por luz artificial, donde la energía necesaria para alimentar los sistemas artificiales de iluminación puede ser obtenida por modernos sistemas eólicos y/o solares como el modelo que se observa en la figura 6.

Figura 6. Modelo de Granja vertical



Fuente: The theory behind the concept of vertical farming [en línea]. South Carolina [Consultado el 12 de octubre de 2014]. Disponible en internet: http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student_verticalfarming.pdf

Una introducción a gran escala de esta tecnología permitiría multiplicar la superficie cultivable prácticamente sin gasto de superficie, lo que ocasionaría revertir varios campos a su estado natural. Además, los defensores del concepto argumentan que se reducirían de manera considerable los costos de transporte y logística por el hecho de que las granjas verticales estarían emplazadas en la cercanía directa de los consumidores.

Figura 7. Superficie cultivable multiplicada - Horizontal Vs Vertical



Fuente: The theory behind the concept of vertical farming [en línea]. South Carolina [Consultado el 12 de octubre de 2014]. Disponible en internet: http://media.clemson.edu/public/restoration/iae/vfarm/student_verticalfarming.pdf

A través de la investigación y el desarrollo de los diferentes tipos de sistemas posibles de implementar en granjas verticales como hidropónicos, acuaponía y sistemas de producción aeropónico, es posible realizar una correcta detección del medio ambiente al interior de la granja, ejecutar diagnósticos por medio de redes de sensores, que permitan la automatización para sistemas de administración autónoma y de captación de energía.

Una importante metodología tiene el potencial para reducir el consumo de agua para la agricultura en un 98% entre otros recursos, eliminar los fertilizantes y pesticidas químicos, densidades dobles de nutrientes y reducir la energía incorporada en los productos por un factor de diez.

3.1 TÉCNICAS PARA EL CRECIMIENTO DE PLANTAS COMESTIBLES EN GRANJAS VERTICALES

La hidroponía, la ciencia del crecimiento de plantas sin suelo, es una de los avances más interesantes en la horticultura moderna. Los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas son usados para producir elegantes y saludables plantas que son libres de hierba mala, plagas y enfermedades transmitidas por el suelo. También conocida como agricultura libre de suelo, las técnicas de hidroponía y aeroponía han sido usadas desde hace mucho tiempo. Hoy en día, la hidroponía juega un rol inmensamente importante en el desarrollo de la agricultura. Incremento de la población, cambios climáticos, erosión del suelo, inequitativa distribución del agua son todos factores que han influenciado métodos o técnicas alternativas de horticultura.

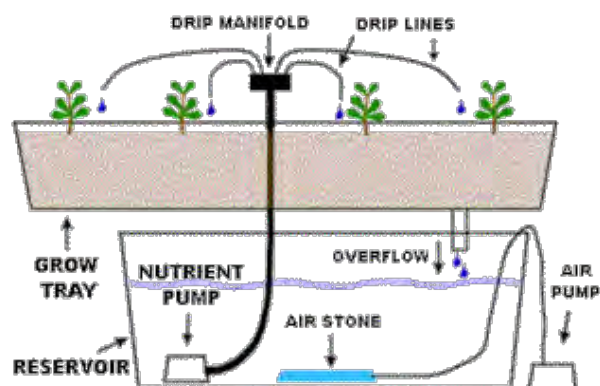
La hidroponía es una manera eficiente de proporcionar alimentos y agua para las plantas. En un jardín convencional, la alimentación y el agua son en algunos casos distribuidos aleatoriamente y las plantas necesitan invertir demasiada energía para el crecimiento de sus raíces para encontrarlos. “En hidroponía, la alimentación y el agua son entregadas directamente a las raíces de las plantas. Por este hecho, las plantas crecen más rápido y pueden ser cultivadas (en el sentido de recoger la cosecha) más temprano debido a que las plantas han invertido sus energías en su crecimiento y no en la búsqueda de alimento”¹⁹.

“Contrario de la creencia popular, no hay diferencias fisiológicas entre el crecimiento de una planta hidropónicamente y aquellas que lo hacen en suelo. Las soluciones nutricionales están listas, refinadas y purificadas, de igual forma están inmediatamente disponibles para las plantas, lo que da como resultado floración y/o frutado a una taza entre el 40 y el 50 por ciento más temprano que en suelo”²⁰.

¹⁹ CARRUTHERS, S. Hydroponic Gardening, 3 ed. Australia: Lothian, 1993. p. 1

²⁰ Ibíd., p. 2

Figura 8. Elementos de un típico Sistema hidropónico por irrigación



Fuente: Hydroponics. [en línea]. [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/hydro_agriculture.html

Los métodos o técnicas de hidroponía permiten a los jardineros controlar los nutrientes disponibles. En una jardinería convencional, una vez los fertilizantes o nutrientes, son agregados al suelo, no hay manera fácil de cambiar o reducir su concentración.

En hidroponía, a diferencia la solución nutricional puede ser ajustada o cambiada para adaptarse a una etapa del proceso de crecimiento o planta en particular.

3.2 ELEMENTOS BASICOS

“Mientras 92 elementos naturales son conocidos, solo 60 de estos han sido encontrados en plantas, de estos 60, solo 16 son considerados esenciales para el crecimiento de ellas. Para ser considerados esenciales en un crecimiento saludable, un elemento debe cumplir con 4 criterios”²¹:

- Debe ser necesariamente para la planta un complemento de su ciclo de vida.
- Su acción debe ser específica (que no sea completamente reemplazable por otro elemento).
- Debe estar directamente implicado en la nutrición de la planta (que es requerido para la acción de una enzima esencial).
- No debe ser incompatible, un efecto toxico con otro elemento.

“Los 16 elementos que son generalmente considerados esenciales para el crecimiento de las plantas están divididos en 2 grupos, los macro elementos, aquellos que son requeridos relativamente en grandes cantidades y los micro elementos, aquellos necesarios en considerablemente pequeñas cantidades”²².

Los macro-elementos son: Carbono (C), hidrogeno (H), oxigeno (O), nitrógeno (N), fosforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sulfuro (S).

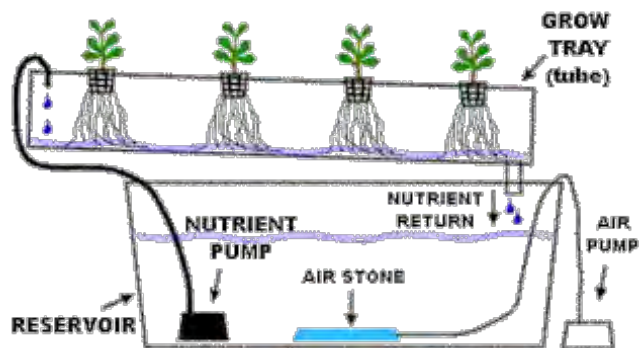
Los micro elementos son: Hierro (Fe), cloro (Cl), boro (B), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y molibdeno (Mo) [24].

Para las aplicaciones hidropónicas, todos los 16 elementos esenciales, mencionados anteriormente son suministrados a las plantas en forma de solución nutricional, donde estos son disueltos en agua.

²¹ Ibíd., p. 3

²² Ibíd., p. 3

Figura 9. Elementos de un típico Sistema hidropónico por flujo



Fuente: Hydroponics. [en línea]. [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/hydro_agriculture.html

“La aeroponía por su parte es el desarrollo más reciente de los sistemas hidropónicos, es definida por la ISOSC como un sistema en donde las raíces de las planta están continuamente o discontinuamente en un ambiente saturado de solución nutritiva. El método no requiere sustrato y conlleva el cultivo de plantas con las raíces suspendidas al aire donde estas son mojadas periódicamente con una fina niebla de nutrientes atomizadas”²³.

“Sistemas aeropónico pueden reducir el consumo de agua en un 98 por ciento , el uso de fertilizantes en un 60 por ciento , y el uso de pesticidas en un 100 por ciento , a la vez que maximiza el rendimiento de los cultivos. Las plantas cultivadas en los sistemas aeropónico también se ha demostrado que absorben más minerales y vitaminas, por lo que las plantas son más saludables y potencialmente más nutritivas como se puede observar en la siguiente imagen”²⁴.

²³ Ibíd., p. 24

²⁴ Progressive Plant Growing Has Business Blooming. [en línea]. [Consultado el 20 abril de 2015]. Disponible en internet: http://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aeroponic_plants.html

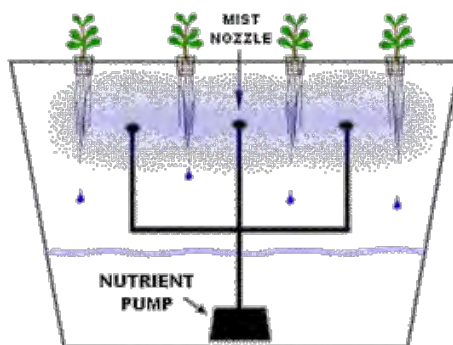
Figura 10. Ilustración de un sistema aeropónico – NASA



Fuente: Progressive Plant Growing Has Business Blooming. [en línea]. [Consultado el 20 abril de 2015]. Disponible en internet: http://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aeroponic_plants.html

El éxito o fracaso de un cultivo hidropónico o aeropónico depende principalmente de un estricto programa de administración nutricional, donde este es alcanzado por una cuidadosa manipulación de los niveles de pH, temperatura y en algunos casos la electro conductividad de la solución

Figura 11. Elementos de un sistema aeropónico



Fuente: Hydroponics. [en línea]. [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/hydro_agriculture.html

“La aeroponía y la hidroponía son técnicas que no requieren pesticidas, requieren menos agua y espacio que la agricultura tradicional, pueden ser apiladas (utilizando luz artificial LED) en lugares donde el espacio es limitado, donde el concepto de granja vertical toma gran importancia”²⁵.

Es por lo anterior que se hace atractiva su implementación en ciudades donde el espacio es particularmente limitado y la población es alta y auto sostenible, como también en naves espaciales donde la tripulación al interior de la misma pueda cultivar su propia comida cuando los viajes así lo requieran.

²⁵ Hydroponics. [en línea]. [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/hydro_agriculture.html

4 VARIABLES Y PARAMETROS PARA LA ADMINISTRACIÓN NUTRICIONAL

“El éxito o fracaso del buen funcionamiento de un cultivo vertical radica en primera instancia en un estricto programa de administración de nutrientes donde algunos parámetros y/o variables deben ser manipulados cuidadosamente”²⁶. A continuación se presentan las variables más relevantes en el proceso de la fotosíntesis y desarrollo de las plantas en una granja vertical.

4.1 NIVEL DE PH

En términos simples, el pH es una medida de acidez o alcalinidad sobre una escala de 1 a 14. En una solución nutricional, el nivel de pH determina la disponibilidad de los elementos esenciales para las plantas. Una solución es considerada neutra a 7.0, alcalina si está por encima y acida, si esta se encuentra por debajo, como se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 12. La escala del pH



Fuente: La lluvia ácida [en línea]. [Consultado el 22 de abril 2015]. Disponible en internet: http://www.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/phscale.html

²⁶ CARRUTHERS, Op. cit., p. 8

En el suelo, la mayoría de las plantas prefieren un nivel de pH sobre el lado ácido del nivel neutral. En hidroponía la mayoría de las plantas prefieren una solución ligeramente ácida. Un valor apropiado puede estar entre 5,8 y 6,5. Para valores de pH por encima de 7,5, el hierro, manganeso, cobre, zinc y boro se vuelven menos disponibles para las plantas. Debería el pH de la solución nutricional caer por debajo de 6,0, entonces la solubilidad del ácido fosfórico, calcio, y manganeso caería bruscamente.

En hidroponía el movimiento del balance del pH da una buena indicación de la actividad de la planta. Si el pH se incrementa o la solución se vuelve más alcalina, esto quiere decir que la planta está tomando más nutrientes ácidos por fuera de la solución, lo que puede ocasionar la acumulación tóxica de sales y la ingesta de agua al límite. Ahora sí, el pH de la solución está cayendo o se está volviendo más ácido, entonces la planta está tomando componentes alcalinos, lo que puede hacer que el nutriente químicamente vinculado a las sales ácidas y a las raíces de las plantas son incapaces de ser absorbidas.

Como regla general, el pH de la solución de nutrientes debe ser monitoreado diariamente y la solución debe ser ajustada si es necesario usando tampones ácidos o alcalinos. Siempre es recomendado efectuar esta actividad a la misma hora del día y si es posible a la misma temperatura, ya que el pH de la solución puede fluctuar dramáticamente con luz o con variaciones de temperatura durante el transcurso del día. Una intensa fotosintética actividad durante las horas de luz causa incremento del pH y al anochecer, cuando el proceso de fotosíntesis cesa, una intensa respiración de la planta causa que el pH caiga²⁷.

²⁷ CARRUTHERS, Op. cit., p. 9

4.2 TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor, frío, templado o tibio, medible mediante un dispositivo de medición tal como un termómetro. Existen varias unidades para expresar el valor de temperatura, las más comunes son: Kelvin, grados Celsius y grados Fahrenheit. La unidad a utilizar será grados Celsius.

4.2.1 Temperatura agua. Fluctuaciones de la temperatura en una solución hidropónica puede afectar no solo el pH sino también la solubilidad de los nutrientes. Estudios han demostrado que una temperatura ideal del agua para una solubilidad total esta entre 20 °C y 22°C. Si la temperatura del agua cae por fuera del rango, entonces muchos oligoelementos se volverán insolubles. Mientras la mayoría de las plantas pueden sobrevivir por fuera de este rango, la salud de la planta y el rendimiento son severamente afectados.

4.2.2 “Temperaturas más altas y más bajas que la ideal, afectan de la misma manera a las plantas como sucede con el pH”²⁸.

4.2.3 Temperatura Solución Nutricional. La temperatura ideal de la solución varia de una planta a otra, esto de acuerdo al tipo de fotosíntesis que maneja, como se mencionó en el anterior capitulo, sin embargo esta debe de estar entre 18°C y 25°C.

4.2.4 Temperatura Plantas. “Las plantas crecen bien dentro de un rango limitado de temperatura. Las temperaturas demasiados altas o demasiado bajas dan como resultado un crecimiento anormal y un desarrollo reducido en el rendimiento (Repasar dificultades). Los vegetales y la mayoría de las flores prefieren un rango de temperatura entre 15°C y 25°C”²⁹.

²⁸ CARRUTHERS, Op. cit., p. 9

²⁹ CARRUTHERS, Op. cit., p. 45

4.3 ELECTROCONDUCTIVIDAD

Durante el crecimiento, las plantas toman los elementos que ellas requieren, de este modo alteran el balance de la solución nutricional día tras día. Este proceso de alimentación es llamado Electroconductividad. Para determinar el grado general de la toma de nutrientes, la restante solución debe ser comprobada diariamente y ajustada si es requerida.

Si una alta concentración de nutrientes es revelada, esto indica que las plantas están tomando más rápido agua de lo que están tomando elementos esenciales. Resulta que, como el agua es absorbida por las plantas, el volumen de la solución decrece, con un subsecuente incremento en la fuerza de nutrientes, lo que podría dañar a las plantas.

“En esta situación, agua fresca debe ser agregada a la solución de nutrientes hasta que la concentración alcance un nivel aceptable. Por lo contrario, por una concentración de nutrientes más bajo de lo normal, las plantas toman más nutrientes que agua y la solución necesita ser ajustada con nutrientes adicionales”³⁰.

4.3.1 Unidades de Electroconductividad. Desafortunadamente hay un número de diferentes términos y unidades usadas para describir el valor de la Electroconductividad. Dentro de la mayoría de la comunidad internacional hidropónica, la terminología estándar es conductividad eléctrica o por sus siglas en Inglés (EC). Las unidades estándar son mili Siemens por centímetro, representada así mS/cm.

4.3.2 “Existe otro término llamado factor de conductividad (CF), que fue introducido en Inglaterra, pero ahora es muy usado principalmente en Nueva Zelanda y en algunas partes de Australia, este no tiene unidades y es 10 veces el valor de EC”³¹.

³⁰ How do I manage EC (electrical conductivity)? [en línea]. [Consultado en Octubre 2014]. Disponible en internet: <http://www.hydroponics.com.au/how-do-i-manage-ec-electrical-conductivity/>

³¹ Ibíd., Disponible en internet: <http://www.hydroponics.com.au/how-do-i-manage-ec-electrical-conductivity/>

4.3.3 Limitaciones de EC. Es importante reconocer que mientras EC da una buena indicación de la fuerza de la solución de nutrientes, esta tiene limitaciones. “La primera es que EC no da absolutamente una muestra del balance nutricional y la segunda es que no mide cualquier componente no iónico en la solución, esto significa que cuando se usa fertilizantes orgánicos la fuerza de la solución será más alta que lo indicado por el medidor de EC, porque la mayoría de los compuestos basados en carbono no son iónicos y no serán registrados por un medidor de EC”³².

Por este motivo y aunque puede ser importante registrar y vigilar el comportamiento de la Electroconductividad de la solución nutricional, esta no será contemplada para el desarrollo de las estrategias de control. Además con un buen monitoreo y control del pH de la solución nutricional, se puede relacionar ese valor con el EC.

4.4 LUZ

La luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio y existe como paquetes de energía discreta, llamada fotones. Cada fotón tiene una longitud de onda específica y un nivel de energía, como se describe a continuación.

$$E = (h * c) / \lambda \quad (2)$$

E= Energía de cada fotón

h = Constante de plank: $6,63 \times 10^{-34}$ J·s

c = Velocidad de la luz: $3,0 \times 10^8$ m/s

λ = longitud de onda, expresada en metros.

La energía lumínica como parámetro es importante para el crecimiento de las plantas. En regiones donde la fuente de luz natural no es suficiente para el crecimiento deseado, fuentes de luz adicional son usadas. Las plantas requieren luz a través de toda su vida útil, desde la germinación hasta florecer y producir semillas. Esta puede ser medida de distintas formas tales como: Foot-candles, lux, watts, $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ y $\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$.

³² Ibíd., Disponible en internet: <http://www.hydroponics.com.au/how-do-i-manage-ec-electrical-conductivity/>

“Existen 3 parámetros de luz de crecimiento usado: Calidad, cantidad y duración. Todos estos 3 parámetros tienen diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas”³³.

4.4.1 Cantidad de luz. “La cantidad de luz es el número de partículas llamadas fotones y principal parámetro que afecta la fotosíntesis, una reacción fotoquímica dentro de los cloroplastos de las células de las plantas vegetales en el que la energía lumínica se utiliza para convertir el CO₂ atmosférico y en carbohidratos, de aquí se desprenden 2 variables, la intensidad de luz y el Daily light integral”³⁴.

4.4.2 Intensidad de luz. Es la cantidad de luz instantánea que reciben las plantas, expresada comúnmente en foot-candles, watts y lux.

4.4.3 Daily light integral (DLI). Es una medición de la cantidad de luz recibida por las plantas durante un día en un área particular, expresada comúnmente por los investigadores en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o $\text{mol/m}^2/\text{day}$.

4.4.4 Calidad de luz – Distribución espectral. “La calidad de luz, se refiere a la distribución espectral de la radiación. Donde la porción de emisión está en azul, verde, rojo, otra región visible e invisible de longitud de onda. Para la fotosíntesis, las plantas responden más fuerte a la luz roja y azul. La distribución espectral de la luz también afecta sobre la forma, desarrollo y floración (foto morfogénesis)”³⁵.

Entre 400 y 520 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz violeta, azul y verde. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis.

Entre 520 y 610 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz verde, amarilla y naranja. Tiene una poca influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis. Es por este motivo que las plantas son verdes, ya que estas, reflejan las longitudes de onda y no son absorbidas.

³³ LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. [en línea]. [Consultado el 24 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

³⁴ Ibíd., Disponible en internet: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

³⁵ Ibíd., Disponible en internet: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

Entre 610 y 720 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz roja. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo, la fotosíntesis, floración y germinación.

4.4.5 Duración de luz. “Conocido como fotoperiodo, principalmente afecta la floración. El tiempo de floración en las plantas, puede ser controlado regulando el fotoperiodo, es decir el tiempo de luz que reciben las plantas”³⁶.

4.5 HUMEDAD

Es la cantidad de vapor de agua en el aire, en su estado gaseoso, esta es invisible e indica, la probabilidad de precipitación, niebla o rocío. Existen tres principales mediciones de humedad, estas son: absoluta, relativa y específica. Para el desarrollo del sistema de control y correcto funcionamiento fisiológico del cultivo, se usara la humedad relativa.

4.5.1 Humedad Relativa (RH). “Expresada como un porcentaje, la RH de inglés (Relative humidity), mide la actual humedad absoluta en relación con el máximo (punto más alto) para esa temperatura. Para la mayoría de los cultivos de la gama aceptable de humedad relativa está entre el 50% - 80%. Sin embargo, para el trabajo de propagación de plantas, humedades relativas hasta 90% pueden ser deseables”³⁷.

³⁶ Disponible en internet: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

³⁷ Diseases and management of crops under protected cultivation [en línea]. Pantnagar, 2012 [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: <http://www.gbpuat.ac.in/26%20CAFT%20Proceeding.pdf#page=150>

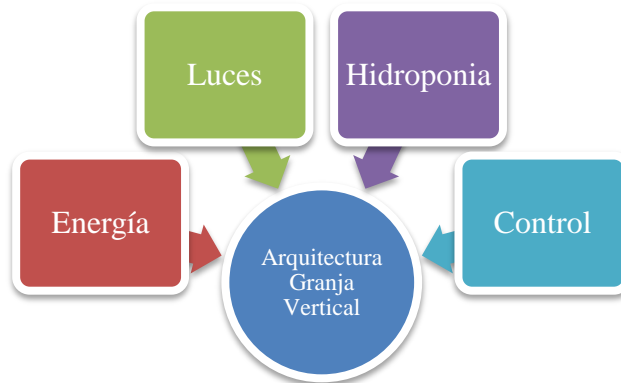
5 DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE GRANJA VERTICAL

“El concepto de granja vertical, también relacionada como Agricultura Integrada en Edificaciones del acrónimo BIA (Building Integrated Agriculture) es un nuevo enfoque de la producción basada en la idea de localizar los sistemas de cultivo de alto rendimiento en los edificios haciendo uso de fuentes renovables, locales de energía y agua”³⁸.

Para diseñar y construir un prototipo de granja vertical es recomendable contar con un entorno ya construido, ya que este ofrece la mínima infraestructura necesaria para su desarrollo, permitiendo un gran ahorro en tiempo y dinero debido a las facilidades que las grandes urbes pueden proporcionar. Por este motivo el costo es una de las desventajas principales que tiene el concepto relacionado con el diseño y la construcción de una granja vertical, ya que este se eleva en más de un 50% en relación a una granja tradicional debido a la tecnificación y a los elementos que la componen.

Afortunadamente en muchas ocasiones las granjas verticales son construidas sobre edificaciones y la gran mayoría de los elementos y/o tecnología requerida está disponible por lo que no es necesario hacer invención de alguna, más si, es necesario hacer una correcta integración, que permita el correcto funcionamiento de la granja, como se puede apreciar en la figura 13.

Figura 13. Sistemas que integran una granja vertical



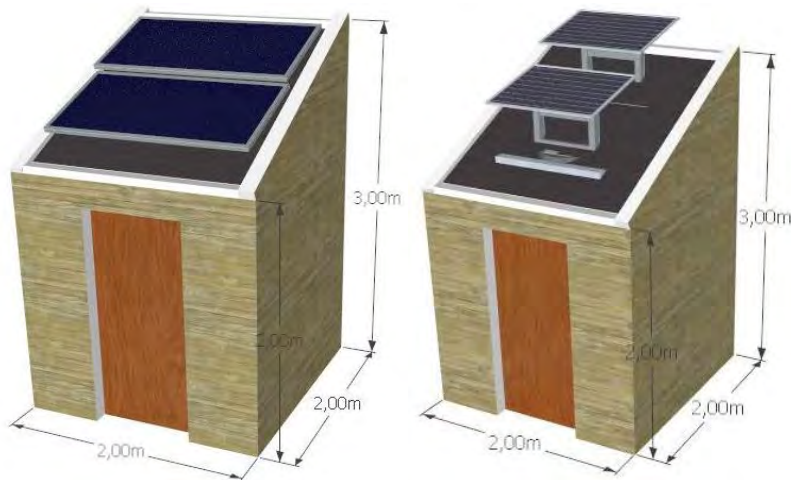
Fuente: Elaboración propia

³⁸ Urban Futures 2030. [en línea]. Berlín: Heinrich-Böll-Stiftung, 2009 [consultado el 28 de junio de 2014]. Disponible en internet: <https://www.boell.de/en/2013/11/19/urban-futures-2030-urban-development-and-urban-lifestyles-future>

5.1 DISEÑO

Para el diseño y la construcción de un prototipo de granja vertical, no existen lineamientos definidos que describan la forma, estilo y elementos que la compongan, sin embargo como se mencionó previamente, para la construcción de una granja vertical, es necesario y/o es una ventaja contar con un entorno ya construido, con el objetivo de aprovechar la infraestructura que este ofrece. Partiendo del hecho que se cuenta con una terraza, azotea o simplemente un espacio de una casa de familia, que no cumple una tarea adicional, de la ciudad de Santiago de Cali, Colombia, con 60 metros cuadrados aproximadamente, se realizaron modelos en relación a la necesidad de establecer un espacio capaz de ofrecer las condiciones necesarias para el desarrollo del proceso de fotosíntesis y crecimiento de plantas comestibles seleccionadas como se puede apreciar en la figura 14.

Figura 14. Modelos de granja vertical



Fuente: Elaboración propia

Los modelos cuentan con las siguientes características:

- Área construcción de 8,6 m².
- Material de construcción madera y plástico.

- Cubierta o techo con inclinación no superior a las 20 grados, para soportar paneles solares y permitir la recolección de agua lluvia de manera segura.
- Sistema fotovoltaico aislado
- Canal recolectora de agua lluvia y tanque almacenador.
- Estructura capaz de albergar a más de 20 plantas
- Sistema electrónico de control de ambiente.
- Luces de crecimiento – emulación solar.

5.2 SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA

En busca de agregarle valor al concepto, la energía eléctrica se convierte en un aspecto importante debido al aporte de sostenibilidad, no solo desde el ahorro sino también desde la forma de adquirir energía en el más amplio sentido de la palabra. Para ello es normal ahora contar con sistemas fotovoltaicos o eólicos capaces de captar la energía solar o del viento para transformarla en eléctrica y así poder otorgar electricidad para el funcionamiento de los sistemas electrónicos, como también recolectores de agua lluvia utilizadas en el riego de los cultivos y refrigeración de las edificaciones.

5.3 CONTROL ELECTRÓNICO

El control electrónico es vital para la granja vertical, sin este, las labores de operación, control y mantenimiento, serían complejas. La electrónica permite el monitoreo constante de todas las variables que intervienen en los procesos del cultivo, facilitando la toma de decisiones referentes a su control o cambio oportuno de los nutrientes y el agua.

Los retos:

- Reducir los costos de ingeniería, operaciones y mantenimiento.
- Maximizar la eficiencia de la planta y mejorar la calidad en la producción.
- Proteger al personal, a los activos de la planta y al medio ambiente.
- Maximizar el retorno de inversión.

5.4 HIDROPONIA

Como técnica principal empleada en las granjas verticales, la hidroponía permite sin el uso de la tierra, otorgar un entorno saludable para el crecimiento de las plantas en granjas verticales. El uso del agua como principal medio transportador de los nutrientes, facilita que estas sean establecidas en las urbes, debido a la no dependencia de tierra para lograr tal fin. Esto permite apilar los cultivos unos sobre otros, es decir maximizar el espacio de cultivo y evitar la presencia de plagas afectando la calidad del cultivo.

5.5 LUCES DE CRECIMIENTO

Las luces de crecimiento son una fuente de luz artificial, en general, diseñada para estimular el crecimiento de plantas mediante la emisión de un espectro electromagnético adecuado para la fotosíntesis.

Las luces para crecimiento de las plantas funcionan de tres maneras diferentes:

- Proporcionan toda la luz que la planta necesita para crecer.
- Complementan la luz natural, sobre todo en los meses de invierno, donde las horas de luz día son cortas.
- Aumentan el periodo de la luz día con el fin de disparar el crecimiento y floración.

Los principales sistemas de iluminación artificial son los siguientes:

5.5.1 Lámparas incandescentes. Son las bombillas tradicionales. Producen luz (roja e infrarroja) por fenómenos de incandescencia del filamento, calentado por el paso de la corriente eléctrica. Desprenden mucho calor y consumen gran cantidad de electricidad, por lo que su rendimiento es muy bajo. Además pueden quemar las plantas si se sitúan demasiado cerca. Es el sistema es muy económico, pero muy poco recomendable.

5.5.2 Lámparas de vapor de mercurio (MV). Producen luz (blanca, azul y verde) por el paso de la corriente eléctrica a través de gases calientes de mercurio a alta presión. Habitualmente se emplean en la iluminación de estadios deportivos, grandes instalaciones y sitios donde se desea una luz de aspecto natural. Se utilizan durante el periodo de crecimiento de las plantas por su alta emisión en la zona azul del espectro, pero son pobres en la zona roja por lo que no se favorecerá la floración. Poseen buena eficiencia.

5.5.3 Lámparas mixtas (incandescentes y de vapor de mercurio). Combinación de una lámpara de vapor de mercurio a alta presión con una lámpara incandescente. De esta manera se consiguen las radiaciones rojas necesarias para la estimulación de la floración de las plantas de interior. El problema es el elevado costo de uso, al reducirse mucho el rendimiento luminoso respecto de las lámparas de vapor de mercurio.

5.5.4 Lámparas fluorescentes. En realidad son lámparas de vapor de mercurio, pero a baja presión. Producen luz (principalmente azul y roja, aunque depende mucho del modelo) mediante fenómenos de fluorescencia del gas sometido a un arco voltaico. Son muy adecuadas para el crecimiento, para los vástagos y para enraizar esquejes, por lo que se recomiendan especialmente durante las primeras etapas de las plantas. Son bastante económicas, tienen un elevado rendimiento luminoso y no emiten demasiado calor. El principal problema es que ocupan mucho espacio.

5.5.5 Lámparas de halogenuros metálicos (MH). Son lámparas de vapor de mercurio a las que se ha añadido en el tubo de descarga yoduros metálicos, que consiguen mejorar considerablemente la capacidad para reproducir el color. Producen una luz blanca, ligeramente azulada, muy apropiada para la germinación, el enraizamiento de esquejes y el crecimiento vegetativo. Suelen emplearse en el alumbrado público. Son más baratas que las lámparas de mercurio, pero tienen menor rendimiento (gastan más electricidad para producir la misma luz).

5.5.6 Lámparas de alta presión de sodio o (HPS). Producen luz (amarilla y anaranjada) por la descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a alta presión. Sin duda son las mejores, puesto que emiten más luz y menos calor. Se usan en parkings y lugares donde el color de la iluminación no es demasiado importante. Proporcionan todos los espectros de luz necesarios para el crecimiento y la floración de las plantas de interior. Son muy eficientes en el consumo de electricidad.

5.5.7 Lámparas LEDs. Las lámparas LEDs permiten la producción de luz brillante y de larga duración, emiten sólo las longitudes de onda de luz correspondientes a los picos de absorción de los procesos fotoquímicos típicos de una planta, es decir que reproducen luz a longitudes de onda específica. En comparación con otros tipos de luces de crecimiento, los LED para las plantas de interior son atractivos debido a que no requieren balastos y producen mucho menos calor que cualquier sistema de iluminación. Además, las plantas iluminadas por LEDs transpiran menos como resultado de la reducción de calor, y por lo tanto el tiempo entre ciclos de riego es más largo, no generan luz ultravioleta ni infrarroja, tampoco poseen partes móviles como filamentos que puedan deteriorarse por vibraciones y el tiempo promedio de vida está alrededor de 50,000 horas y su tiempo de encendido es prácticamente instantáneo.

Otro aspecto importante de las lámparas LED es que el ángulo de emisión de luz es menor a 180 grados, lo cual implica que toda la luz generada está enfocada hacia la parte frontal del LED, lo que no ocurre con los otros sistemas de iluminación, las cuales generan luz en todas las direcciones, haciendo necesario el uso de superficies que reflejen la luz emitida por el bombillo en otras y se focalicen hacia adelante, ocasionando pérdidas por reflexión.

De esta manera integrando estos sistemas individuales se construye un prototipo de granja vertical, capaz de mejorar el desarrollo vegetativo para maximizar la capacidad productiva de las plantas en un entorno cerrado.

En la siguiente serie de imágenes se puede apreciar el proceso de construcción de la granja vertical. En estas se observan los materiales utilizados, la estructura en proceso, algunos elementos y finalmente la zona de cultivo, ver figuras 15 – 17.

Figura 15. a) Instalación bases, b) Estructura granja construida



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. a) Base para cultivo, b) Sistema solar



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Zona de cultivo vertical construida



Fuente: Elaboración propia

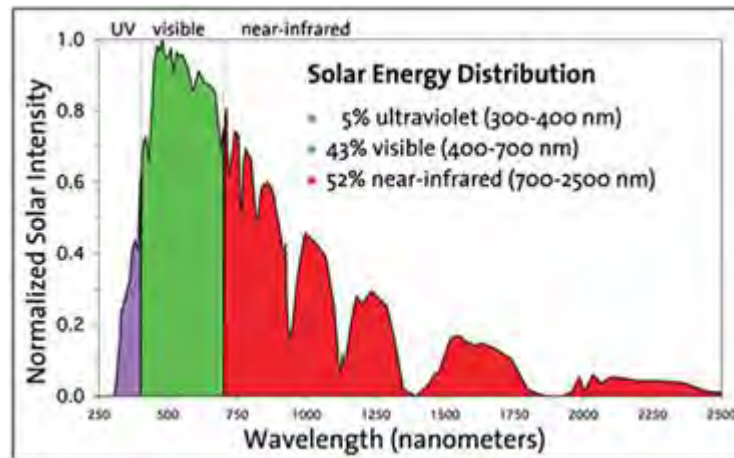
6 EMULACIÓN SOLAR

6.1 LUZ SOLAR

La luz es básica para la vida en la tierra. Por medio de la fotosíntesis, las plantas convierten en energía química la energía transferida por la luz solar. Además, la luz es el medio principal por el cual podemos transmitir y recibir información hacia y desde objetos situados a nuestro alrededor y en todo el universo.

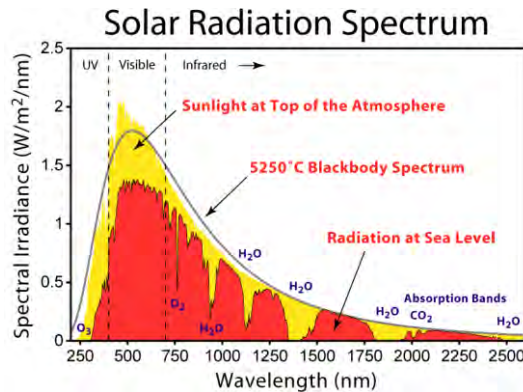
El sol es la principal fuente gratuita capaz de emitir rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja e inclusive ondas de radio como se puede apreciar en la siguiente imagen. Sin embargo dentro de esta gran cantidad de tipos de ondas electromagnéticas que el sol emite, algunos tipos no son apropiados para cualquier ser vivo, y en especial para algunas plantas, como por ejemplo la luz ultravioleta B y C. En la figura 18 sobre el eje Y se presenta la intensidad solar normalizada versus la longitud de onda sobre el eje X, como también representado en porcentajes la distribución de la energía solar.

Figura 18. Distribución de la energía solar



Fuente: The spectrum of solar radiation. [en línea]. [Consultado el 2 de mayo de 2015]. Disponible en internet:<http://www.intechopen.com/books/biofuels-economy-environment-and-sustainability/the-possibility-of-future-biofuels-production-using-waste-carbon-dioxide-and-solar-energy>

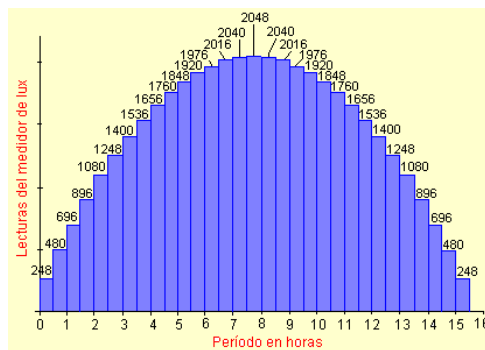
Figura 19. Espectro radiación solar



Fuente: Solar radiation spectrum. [en línea]. [Consultado el 2 de mayo de 2015]. Disponible en internet: <http://www.intechopen.com/books/biofuels-economy-environment-and-sustainability/the-possibility-of-future-biofuels-production-using-waste-carbon-dioxide-and-solar-energy>

En consecuencia, tan solo el 43% de todo el espectro de la distribución y radiación solar, corresponde a luz visible, lo que deja al descubierto la baja eficiencia de la luz solar, para con el proceso de fotosíntesis en las plantas. Del 43% solo una porción es efectiva para estimular el proceso en sí. En condiciones naturales, las tasas máximas de fotosíntesis se alcanzan en las hojas individuales de muchas especies entre el 25 y 35% de la intensidad de la luz solar plena y en algunas especies de sombra a intensidades aún más bajas. A continuación se presentan en la figura 20 el comportamiento ondulatorio pleno de la luz solar con sus respectivos valores de intensidad de luz.

Figura 20. Intensidad de luz solar



Fuente: La fotosíntesis. [en línea]. [Consultado el 2 de mayo de 2015]. Disponible en internet: <http://www.fca.unl.edu.ar/Intdef/Lafotosintesis.htm>

6.2 LUZ ARTIFICIAL LED

Aunque la luz solar, presente un bajo rendimiento con el proceso de la fotosíntesis de algunas plantas, presenta un comportamiento ondulatorio interesante para su recreación con iluminación artificial LED. Para ello, es necesario identificar características esenciales, con que debe contar el sistema de iluminación, para estimular positivamente a las plantas.

Una de esas características con que debe contar la fuente de luz es la longitud de onda. Como se mencionó anteriormente, las longitudes de ondas efectivas para el proceso de la fotosíntesis están entre 400 y 500 nm y entre 600 y 700 nm, longitudes de onda que estimulan la germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo y floración de las plantas por medio sus pigmentos foto sensitivos, como se observa en la siguiente imagen. Todas etapas inherentes a la fotosíntesis.

Tabla 1. Absorción de longitudes de onda para los pigmentos foto sensitivos

Longitudes de ondas absorbidas por los pigmentos foto sensitivos de las plantas							
Pigmentos de las plantas	UV	Azul	Verde	Amarrillo	Naranja	Rojo	Rojo profundo
Longitud de onda (nm)	200-400	400-495	495-570	570-590	590-620	620-710	710-850
Clorofila A		X				X	
Clorofila B		X				X	
Carotenoides		X					
Criptocromos	X	X					
Fototropinas	X	X					
Fitocromo rojo						X	
Fitocromo rojo profundo							X
Todos los pigmentos	X	X				X	X

Fuente: Tabla elaborada a partir de Absorption wavelengths of plant photosensitive pigments. [en línea]. [Consultado el 23 mayo de 2015]. Disponible en internet: <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>

Identificadas las longitudes de ondas más efectivas, se inicia la etapa de selección de los dispositivos semiconductores LED, capaces de emitir luz a estas específicas longitudes de onda.

Para la selección de los dispositivos LEDs se tuvieron en cuenta parámetros importantes mencionados a continuación de acuerdo a su relevancia, tales como: Longitud de onda, eficiencia, precio, ángulo de emisión y consumo de potencia.

Realizada una extensiva búsqueda se preseleccionaron 4 dispositivos de acuerdo a la longitud de onda seleccionada, como parámetro más relevante, donde se obtuvo una referencia por cada longitud de onda con el puntaje más alto, este dispositivo se encuentra resaltado en la siguiente tabla.

Tabla 2. Cuadro de selección LED

Item (Led azules)	Número de manufactura	Longitud de onda (nm)	Flux @ 25°C, corriente de prueba (mW)	Precio (Dólar)	Angulo de emisión (Grados)	Consumo de potencia (W)
1	XPEBRY-L1-0000-00P01	458	575	2.57	135	1.085
2	XBDROY-00-0000-000000L01	458	513	2	115	1.085
3	XPEBRY-L1-0000-00M01	458	538	2.29	135	1.085
4	ASMT-JB31-NNP01	460	250	1.71	165	1.12
Item (Led rojos)	Número de manufactura	Longitud de onda (nm)	Flux @ 25°C, corriente de prueba (mW)	Precio (Dólar)	Angulo de emisión (Grados)	Consumo de potencia (W)
1	LHCPDP-2T3T-1-0-350-R18	645	355	1.85	150	0.735
2	LXZ1-PD01-0056	655	354	3.5	145	0.77
3	LXML-PD01-0040	645	338	3.65	120	1.26
4	LXZ1-PA01	655	350	2.73	120	1.125

Fuente: Elaboración propia

Seleccionados los dispositivos, la siguiente etapa consistió en la configuración o ubicación de los LEDs, esta se diseñó partiendo del hecho que los LEDs azules son un 40% más eficiente que los LEDs rojos, por lo que el criterio de configuración y diseño del panel o lámpara LED fue, ubicar por cada 2 LEDs rojos 1 LED azul, lo que permite tener un mejor patrón de iluminación, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 21. Configuración panel LED

ITEM	1	2	3	4	5
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo al final, la relación de dispositivos LED azules versus los rojos es de 18:32, es decir un patrón de homogeneidad del 91%, con el objetivo de facilitar su operación. A continuación se presentan imágenes relacionadas con el ensamblaje de los LEDs.

Figura 22. Ensamblaje PCB LED

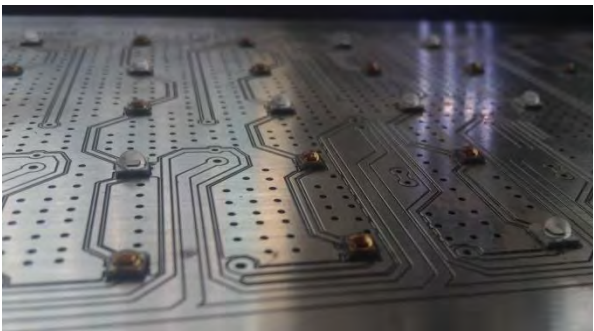


Figura 23. Prueba PCB LED

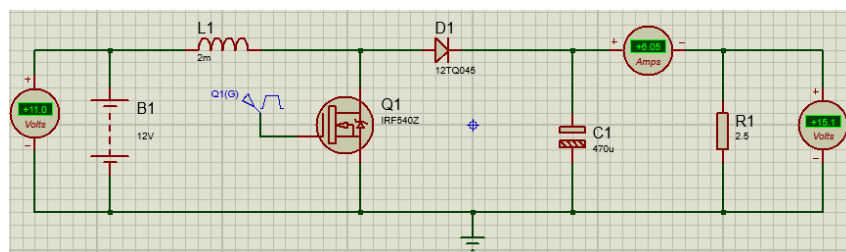


Fuente: Elaboración propia

Definido los dispositivos a usar y el diseño de la lámpara o panel LED, se procede al diseño de los circuitos electrónicos que permite emular el efecto o comportamiento de la luz solar sobre las plantas. Para ello se diseñó una fuente Boost capaz tomar la energía almacenada en las baterías del sistema solar, 12 volts y elevar la tensión a 15 volts para entregar hasta 105 watts de potencia para alimentar la lámpara LED.

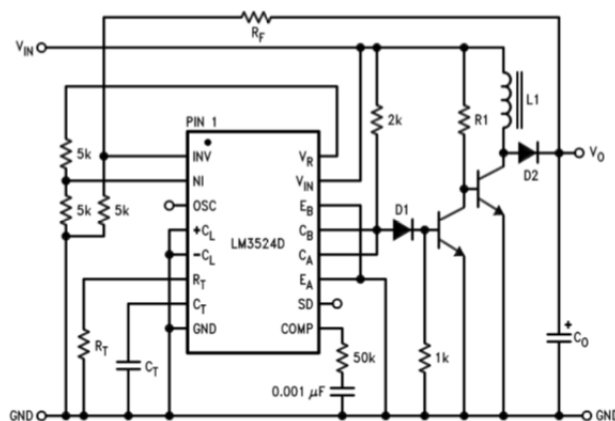
Este convertidor fue desarrollado con el controlador SG3524 o LM3524 que integra todas las funciones necesarias para el desarrollo de una fuente conmutada, a continuación se presenta la imagen del circuito topología Boost en lazo abierto y lazo cerrado.

Figura 24. Convertidor Boost a lazo abierto



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Convertidor Boost a lazo cerrado



Fuente: LM3524. [en línea]. [Consultado el 10 de agosto de 2015]. Disponible en internet: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm2524d.pdf>

Las ecuaciones que permiten el cálculo de cada uno de los valores, correspondientes a los elementos que componen el circuito se presentan en breve.

$$RF = 5K \frac{15V}{2.5} - 1 \quad (3)$$

$$f_{OSC} = \frac{1}{R_{TC_T}} \quad (4)$$

$$L1 = \frac{2.5VIN^2(V_o - V_i)}{f_{OSC} I_o V_o^2} \quad (5)$$

$$C_o = \frac{I_o (V_o - V_i)}{f_{OSC} \Delta V_o V_o} \quad (6)$$

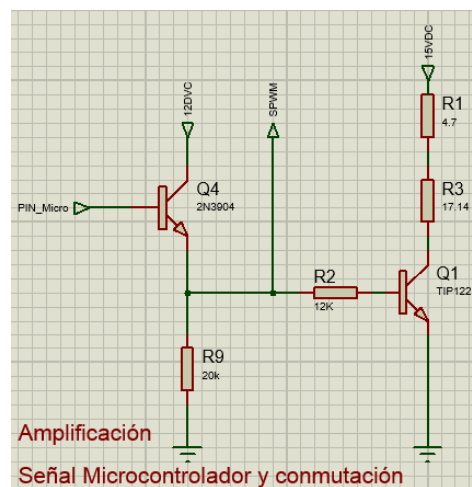
$$I_{o(MAX)} = I_{IN} \frac{VIN}{V_o} \quad (7)$$

De esta forma los valores arrojados por los cálculos de acuerdo a las características de la fuente requerida son:

- D = 20 %
- RF = 12k Ω
- Fosc = 50k Hz
- L1 = 13,8 μ H
- Io Max = 7 A
- Co min = 280 μ F

Diseñada la fuente capaz de entregar la energía para encender los LEDs se diseña la etapa de conmutación o de potencia.

Figura 26. Circuito de amplificación y conmutación

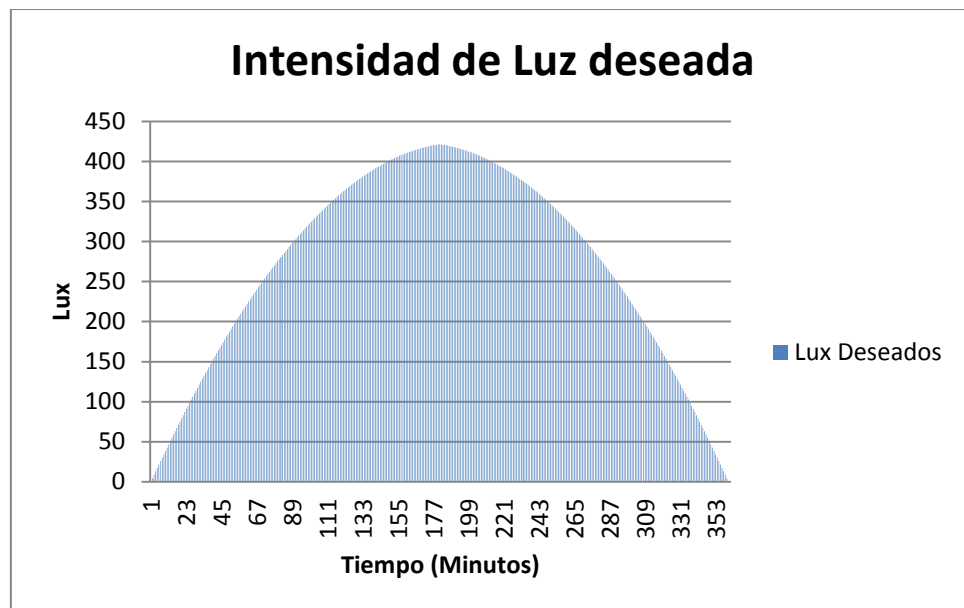


Fuente: Elaboración propia

Esta comprende el uso de transistores BJT (Bipolar Junction Transistor) en configuración seguidor e inversor, emisor común en cascada. Esta configuración permite manejar hasta 700 mA por cada columna de LEDs y efectuar la conmutación para generar la emulación solar. Para el circuito seguidor se usó el transistor 2N2222 y para el inversor se usó el TIP 122 ya que al ser Darlington posee una alta ganancia, lo que implica el uso de una corriente muy baja sobre la base para conmutar el transistor.

Diseñada la fuente de alimentación se realizó un código de programación en lenguaje C capaz de recrear por medio de la técnica de modulación por ancho de pulso, PWM, del inglés (Pulse width modulation), la intensidad lumínica recibida por el sol durante un día, de esta forma se controla la intensidad de luz de la lámpara LED para iluminar el cultivo. En las siguientes imágenes se puede observar la señal esperada, la generada desde el microcontrolador DSpic30F4011y captada con el osciloscopio, como también la señal obtenida o captada con el lux meter, instrumento de medición de intensidad de luz.

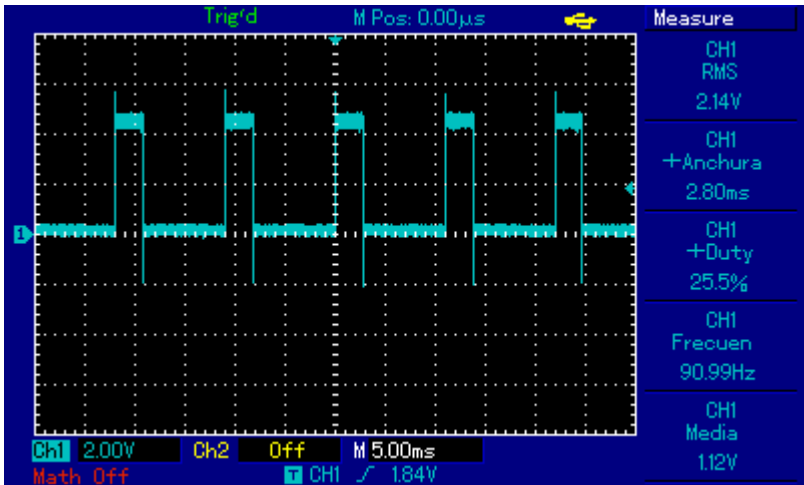
Figura 27. Señal emulación solar esperada



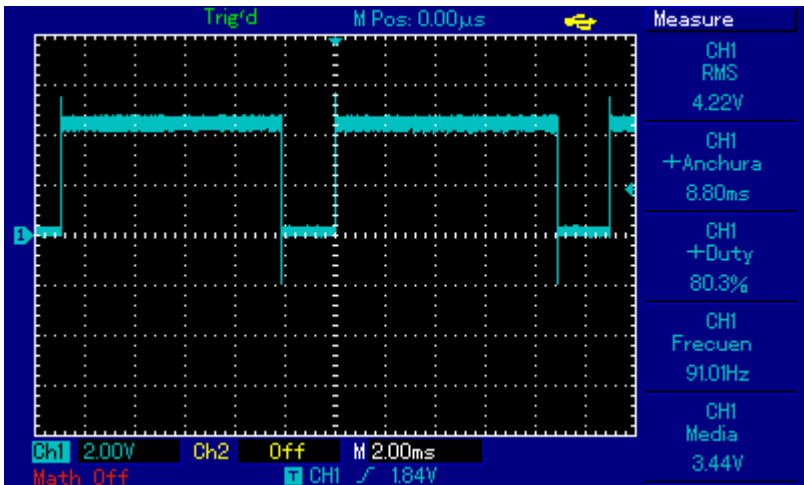
Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Señal emulación solar generada y captada con osciloscopio, a) ciclo útil del 25%, b) 80%

a)



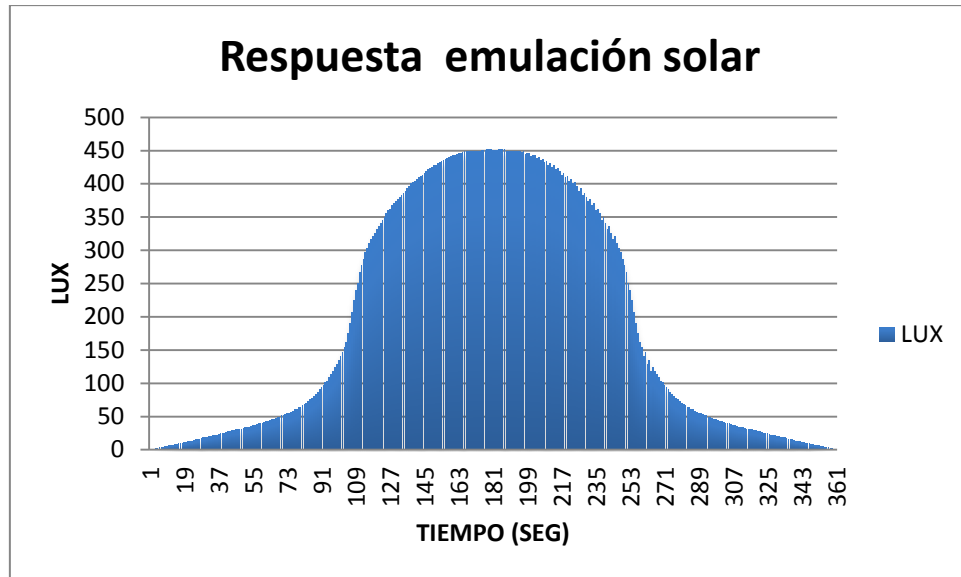
b)



Fuente: Elaboración propia

La anterior forma de onda, se logra aumentando cada segundo el valor del ciclo útil del PWM en una unidad hasta completar el valor de 10988, valor máximo que representa el 100% del ciclo útil, para la frecuencia de conmutación de 91 Hz, luego este valor se opera con la función seno que permite realizar la conversión del ciclo útil lineal a un ciclo útil sinusoidal.

Figura 29. Señal emulación solar captada con luxómetro

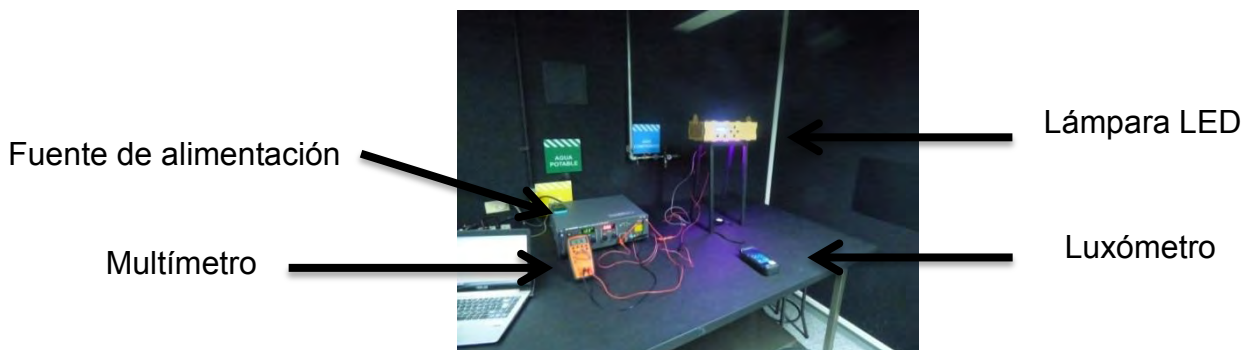


Fuente: Elaboración propia

Aunque la señal esperada y generada con el microcontrolador es muy similar, la señal captada con el medidor de lux no, esto debido a que el medidor no está diseñado para captar intensidad de luz monolítica y su tiempo de respuesta es muy alto, sin embargo permite dar una referencia del comportamiento deseado.

Los datos anteriormente mencionados se obtuvieron de diferentes pruebas realizadas en el laboratorio de física moderna de la Universidad Autónoma de Occidente, ver figuras 32 – 34.

Figura 30. Equipos e instrumentos necesarios para las pruebas



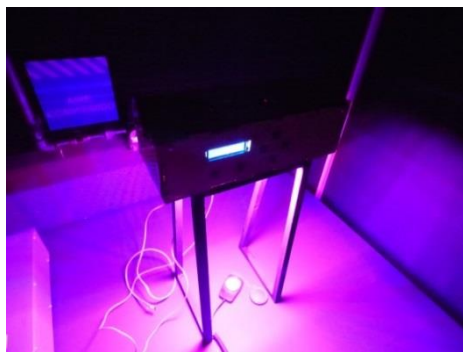
Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Luxómetro registrando medición



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Equipo en funcionamiento



Fuente: Elaboración propia

7 DESARROLLO SISTEMA DE CONTROL Y VALIDACIÓN

Sistemas micro controlados o computarizados pueden ser usados para el control de ambiente, es decir un sistema donde intervienen la temperatura, la humedad, la intensidad de la luz y el nivel del pH de la solución de nutrientes como variables más relevantes en una granja vertical para con el proceso de la fotosíntesis y crecimientos de las plantas. En orden de mejorar el desarrollo de un cultivo específico y minimizar el costo de producción se ha convertido cada vez más importante para los investigadores y cultivadores el desarrollo de sistemas de control.

Las convencionales técnicas de regulación (control adaptativo multivariable, control óptimo y control lógico) han sido desarrolladas. La interacción entre las diferentes variables y la complejidad del fenómeno (multivariable, no lineal y no estacionario) son de tal manera a menudo, difícil de implementar con las técnicas de control o regulación tradicional. Para resolver este tipo de problema, se proponen diferentes estrategias de control, esto de acuerdo al comportamiento de cada variable y la relación entre ellas.

Un buen micro clima (temperatura, humedad y luz) está totalmente relacionado con la estructura de la granja o zona de cultivo, las plantas, etc. En la actualidad pocos invernaderos y algunas granjas verticales están equipados con sofisticados sistemas de control, todavía están controlados manualmente y requieren la intervención de operarios, lo que resta potencial y/o eficiencia a la granja.

En busca de dar solución a ese problema, para la puesta en funcionamiento del sistema de control se usará un microcontrolador de microchip, referencia dsPIC30F4011, como se puede apreciar en la siguiente imagen, figura 35. Este dispositivo combina algunas funciones de DSC y DSP (Digital signal controller – Digital signal processing) por sus siglas en Ingles, con las de los controladores embebidos, aumentando la capacidad y rendimiento en un solo núcleo, funcionalidad que algunos otros microcontroladores y/o plataformas hardware no poseen.

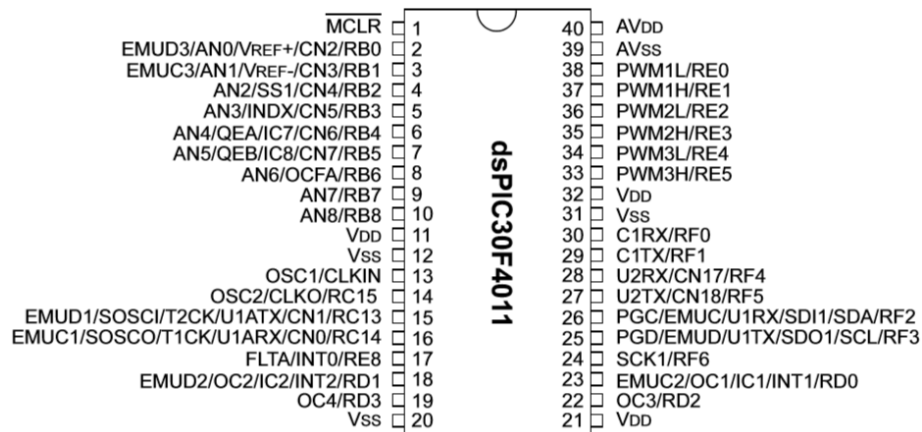
Arduino por ejemplo es una importante plataforma hardware de gran fuerza comercial, versátil, con múltiples modelos y con una amplia gama de módulos de sensores acondicionados para su correcta operación, sin embargo su costo es elevado en comparación al dsPIC seleccionado, lo que pone en consideración su uso.

Algunas de las principales características más relevantes por las que fue seleccionado son:

- Arquitectura Harvard modificada.
- 2Kbytes RAM.
- 1Kbytes EEPROM.
- Hasta 30 MIPS de operación.
- 30 diferentes fuentes de interrupción.
- Hasta 25 mA de operación en corriente por pin.
- 5 módulos temporizador/contador de 16 bits.
- 6 canales de salida PWM con 3 diferentes ciclos útil.
- 9 canales de conversión analógica a digital de 10 bits.
- Amplio rango de tensión de operación (2,5V a 5V).

Ya que los sensores entregan una señal lineal en algunos casos y son alimentados con 5 V de tensión, no es necesario implementar circuitos acondicionadores, lo que permite ahorrar espacio y elementos del hardware. En el dsPIC30F4011 y empleando la programación en lenguaje C, se desarrollan los algoritmos y códigos correspondientes al acondicionamiento de las señales analógicas que así lo requieren y cada estrategia de control, que permita dar solución al control de ambiente y a los diferentes problemas de las variables.

Figura 33. Microcontrolador de uso

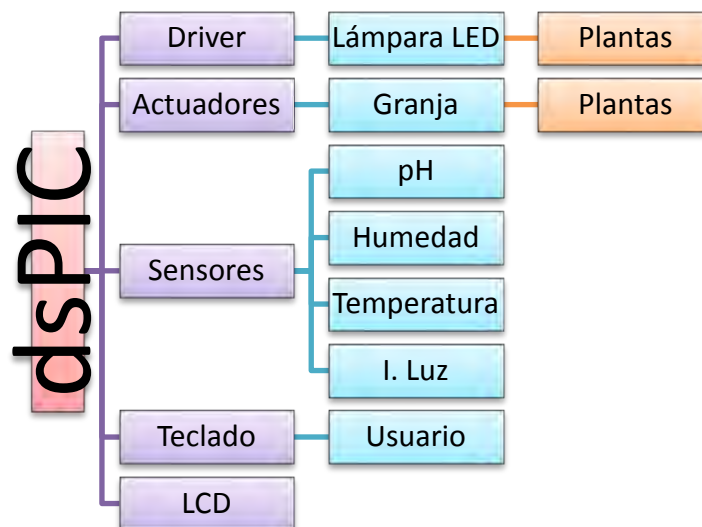


Fuente: dsPIC30F4011. [en línea]. [Consultado en Octubre 2014]. Disponible en internet:

<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=dsPIC30F4011>

De esta forma, el diseño de un sistema capaz de cumplir con el objetivo propuesto se integra de la siguiente manera.

Figura 34. Descripción grafica del sistema diseñado



Fuente: Elaboración propia

7.1 CONTROLADOR NIVEL PH

Definido en el capítulo 4, el pH es una variable de vital importancia para el correcto funcionamiento de la granja vertical. Esta indica el nivel de acidez o alcalinidad de la solución de nutrientes, alimento de las plantas por medio de la hidroponía.

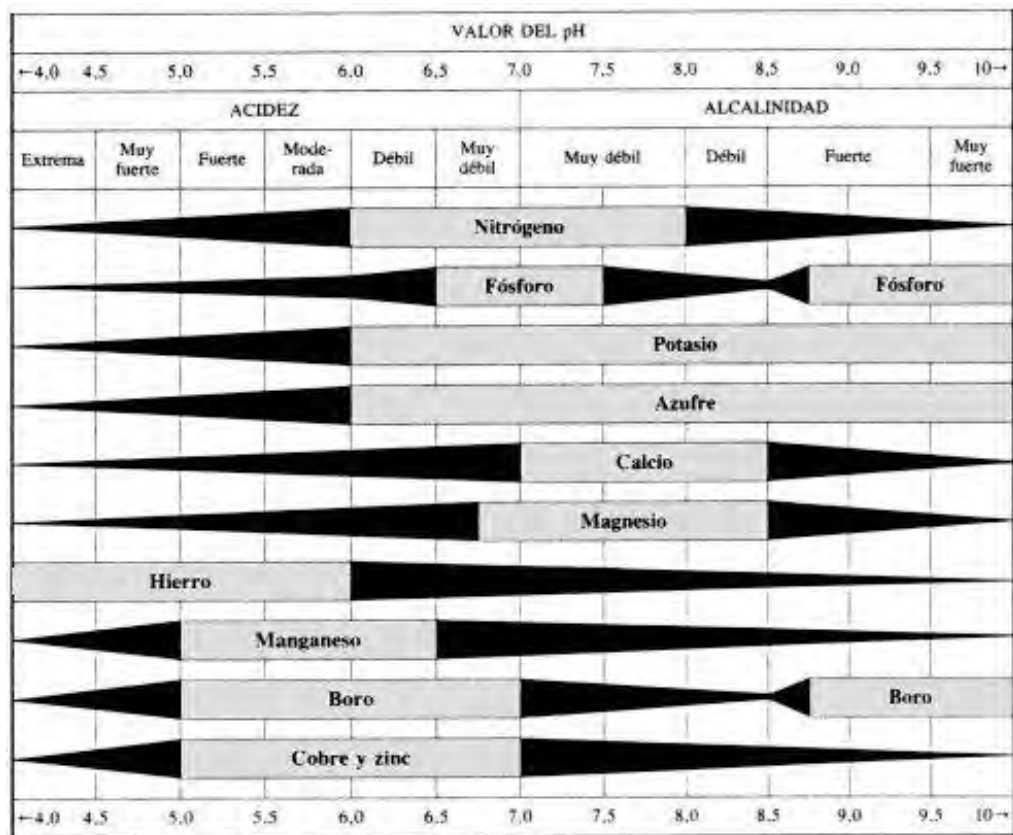
Técnicamente el pH es una variable de respuesta lenta y con relación a las otras variables, es la más lenta de las que intervienen en la granja. Aunque los instrumentos de medición de pH pueden captar variaciones en 1 minuto, es necesario esperar más tiempo para lograr una estabilización de la medición, alrededor de 2 minutos antes de realizar el muestreo de la variable.

Para la aplicación y el desarrollo del control del pH de la solución nutricional es recomendado que la medición se realice preferiblemente en las mismas condiciones ambientales (temperatura y humedad) y diariamente y a la misma hora.

Esto con el objetivo de garantizar confiabilidad en la medición, debido a que el comportamiento del cultivo es lo que determina el nivel del pH.

Por este motivo el tipo de controlador considerado para mantener el nivel de pH lo más cerca posible al rango de operación y al valor deseado, sin invertir gran poder de procesamiento digital es el ON – OFF, por medio del microcontrolador. El rango de operación del nivel de pH debe ser entre 5,8 y 6,5, rango donde se presenta la mayor disponibilidad de los nutrientes para las plantas como se puede apreciar en la figura 37.

Figura 35. Disponibilidad de nutrientes



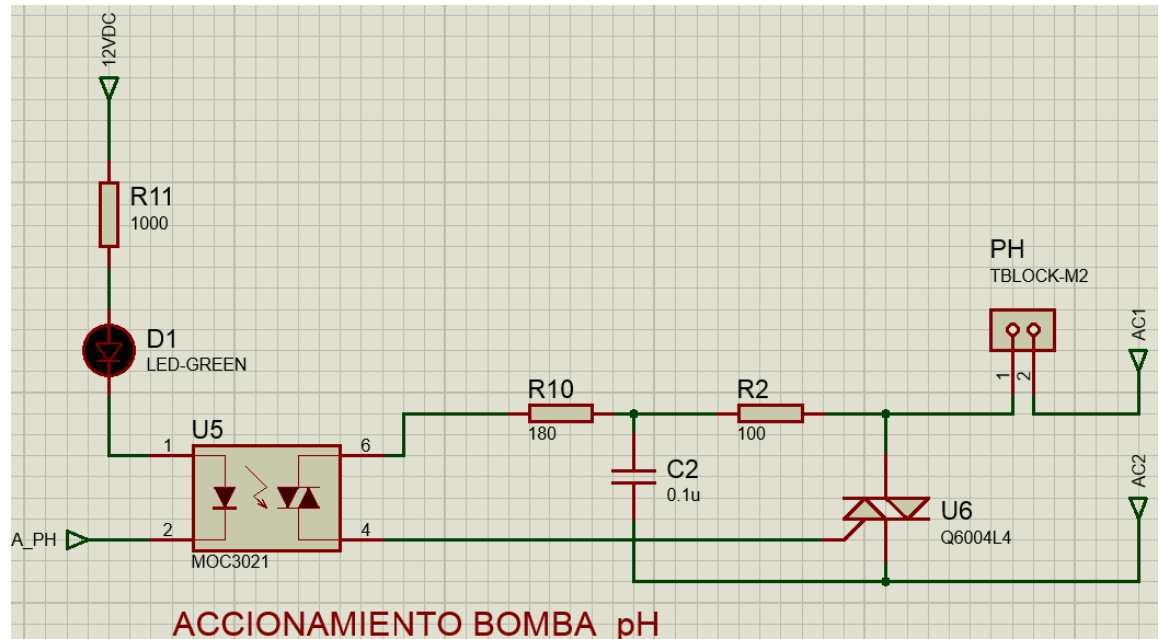
Fuente: Disponibilidad de nutrientes. [en línea]. [Consultado el 14 de abril de 2015]. Disponible en internet: <http://marihuanacultivo.com/nutrientes.jpg>

De esta forma si el pH aumenta por fuera del rango de operación establecido ($pH > 6,8$) el sistema de control actúa, encendiendo la bomba de control pH alcalino para aplicar a la solución de nutrientes una pequeña cantidad de ácido fosfórico o ácido nítrico, lo que permite que el nivel de pH baje hasta que se estabilice en el rango de operación deseado. Si, por lo contrario el nivel del pH cae ($pH < 5,8$) el sistema de control enciende la bomba de control pH ácido para aplicar hidróxido de potasio, lo que ocasiona el incremento del nivel de pH hasta alcanzar el rango de operación deseado.

Debido a que la dosis de las soluciones de control (ácido fosfórico - hidróxido de potasio) deben ser pequeña, la acción de las bombas es corta. Estas permanecen encendidas aproximadamente 2 segundos, tiempo en el cual fluirán $166,6E^{-6} m^3$ de solución correspondiente. Las características de la bomba se describen en la página 74.

El circuito electrónico capaz de efectuar el accionamiento de la bomba se presenta a continuación.

Figura 36. Control carga en AC



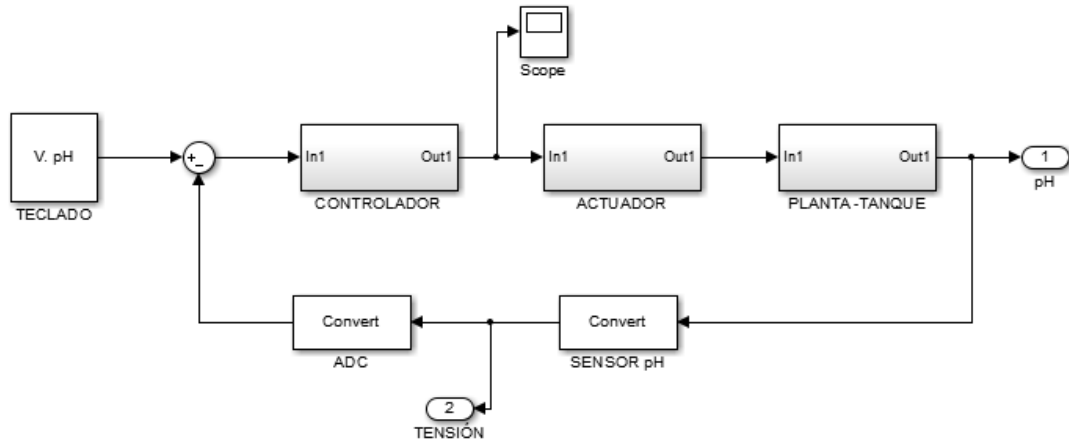
Fuente: Elaboración propia

Este circuito permite el encendido de la bomba de control de pH por medio de un nivel lógico bajo, lo que evita que la energía necesaria para encender el LED indicador y el LED interno del opto acoplador sea suministrado por el pin del microcontrolador, limitado para entregar una corriente máxima.

De igual forma y de manera segura el circuito contempla una Red Snubber capaz de evitar el accionamiento involuntario de la carga al ser esta de naturaleza inductiva. El aislamiento óptico por medio del opto transistor MOC3021 es efectivo para evitar comunicación directa entre la etapa del circuito general en DC, fuente de energía principal del microcontrolador del proyecto y la etapa de potencia (AC).

En la siguiente imagen se presenta el lazo de control para la variable de pH.

Figura 37. Lazo de control pH



Fuente: Elaboración propia

Para el monitoreo de esta variable analógica se puede hacer uso de distintos instrumentos tales como un medidor de pH de bolsillo u otros más elaborados o prácticos que faciliten su manipulación para beneficio, como el dispositivo que se observa en la siguiente figura. Este dispositivo fue seleccionado debido a su respuesta lineal y fácil manipulación debido a que cuenta con su propio circuito acondicionador.

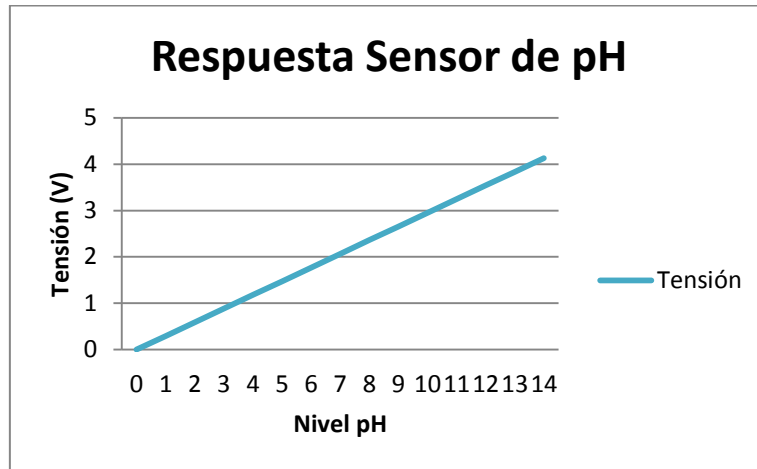
Figura 38. Sensor de pH



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta la figura que demuestra la respuesta del sensor.

Figura 39. Respuesta sensor de pH



Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar en la anterior figura, la repuesta frente a cada nivel de pH se encuentra cuantizada en un valor por tensión de 0,295 Volts, lo que permite obtener una respuesta lineal, descrita en breve, facilitando el acondicionamiento digital.

$$b = 0 ; m = 0,295; Y = mX + b \quad (8)$$

Conociendo la respuesta del sensor y el tipo de controlador, se presenta el actuador y el código en C que permite efectuar el control.

El actuador es una bomba sumergible de 15 W de potencia, alimentada por tensión alterna y capaz de mover hasta 800 litros en una hora, esta se puede observar en la siguiente figura a la derecha.

Figura 40. Actuador del sistema de control – Bomba sumergible



Fuente: Elaboración propia

En la figura 43 se puede apreciar el código en lenguaje C, que permite ejercer control sobre el nivel de pH de la solución de nutrientes. De esta forma, esta lógica evita que el nivel de pH de la solución alcance niveles peligrosos, activando la bomba de solución alcalina, para reducir así el pH a valores deseados.

Figura 41. Código en C, compilador CCS

```
if(minutos%2==0)
{
    set_adc_channel(6);delay_us(10);ph = read_adc();
    ph=(ph/6.05);
    phc = (ph / 100);
    phd = ((ph % 100) / 10);
    phu = ((ph % 100) % 10);

    control_ph();
}

if(ph>65){output_low(ALARMA);output_low(BOMBALCALINA_PH);
delay_ms(2030);output_high(BOMBALCALINA_PH)}
else{output_high(BOMBALCALINA_PH);output_high(ALARMA);}
```

Fuente: Elaboración propia

Finalmente en la siguiente figura, se presenta la implementación y funcionamiento del sistema de control del nivel de pH, por medio de un mensaje en una pantalla.

Figura 42. Monitoreo variable nivel pH



Fuente: Elaboración propia

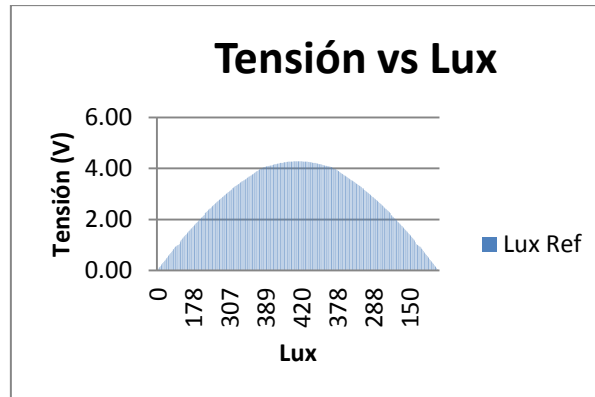
7.2 CONTROLADOR INTENSIDAD DE LUZ

La luz, definida anteriormente como una onda electromagnética que viaja a través del espacio y existe como paquetes de energía discreta, llamada fotones con una longitud de onda específica y un nivel de energía, es el parámetro más rápido del sistema, donde la velocidad de la luz viaja a $3,0 \times 10^8$ m/s sin embargo para el desarrollo del sistema de control, la velocidad de la luz no es lo importante, la variable a considerar es la intensidad de luz que registra la cantidad de luz instantánea recibida por las plantas, cuya unidad de medida para este caso, es expresada en lux.

La intensidad de la luz es la variable más importante para con el proceso de fotosíntesis, si no se considera esta, es posible que se ponga en riesgo el desarrollo vegetativo de la planta y por ende la capacidad productiva de las plantas al interior de una granja vertical. Para asegurar este hecho se propone emular el comportamiento solar por medio de un sistema de iluminación LED, sistema que a manera experimental, permita contribuir con la maximización de la capacidad productiva de las plantas, ya sea en tamaño, crecimiento y floración.

Debido a que el sistema de iluminación debe de emular el comportamiento solar, es decir, variar la intensidad de luz progresivamente en forma de media onda sinusoidal, se pensó en un controlador tipo proporcional integral (PI) que permitiría de manera confiable seguir la referencia propuesta con el mínimo error posible. A continuación se presenta la gráfica que demuestra el comportamiento de la intensidad de luz a cumplir.

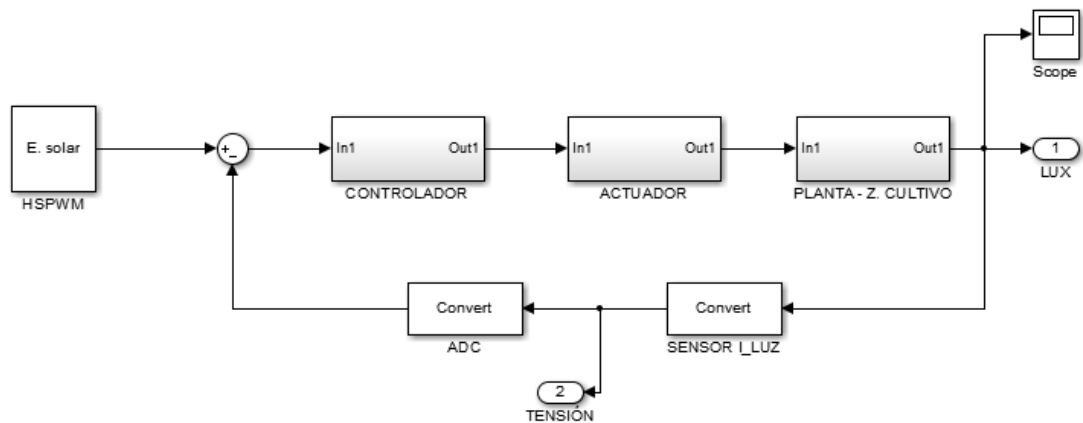
Figura 43. Media onda sinusoidal referencia de control



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen se presenta el lazo de control para la variable intensidad de luz, donde E. solar, representa emulación solar o referencia.

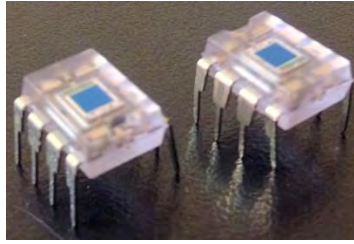
Figura 44. Lazo de control intensidad de luz



Fuente: Elaboración propia

Para el monitoreo de esta variable analógica se puede hacer uso de distintos instrumentos tales como un medidor de luz ambiente, fotoceldas u otros más elaborados o prácticos que faciliten su manipulación para beneficio, como el dispositivo que se observa en la siguiente figura, un sensor de intensidad de luz de referencia OPT101 específico para la aplicación, debido a su rápida respuesta ante pequeñas variaciones de intensidad de luz.

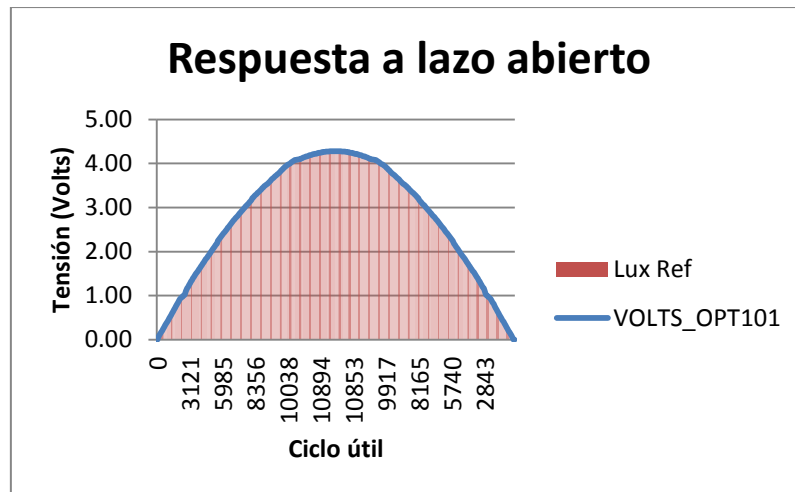
Figura 45. Sensor de intensidad de luz



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta la figura que demuestra la respuesta en lazo abierto del comportamiento del sistema de iluminación, ante la señal de referencia generada desde el microcontrolador, como se explicó en el capítulo de emulación solar.

Figura 46. Respuesta a lazo abierto del sistema de iluminación



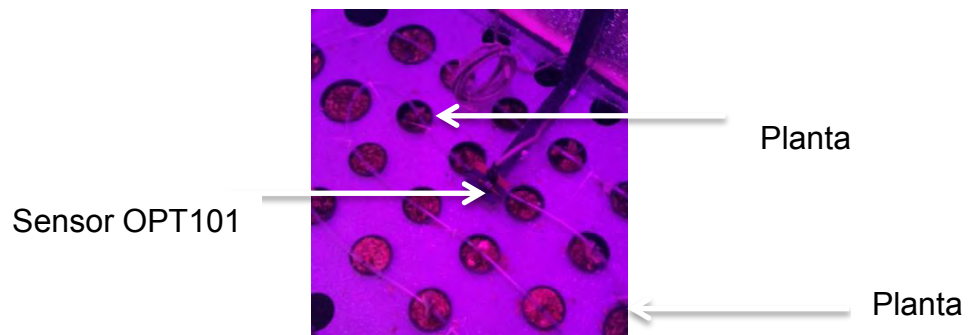
Fuente: Elaboración propia

Como se pudo observar en la anterior figura, la repuesta frente a la señal de referencia, vista en la figura 45 es igual a la captada, lo que indica que la función que describe la generación o emulación solar es correcta y que el algoritmo de generación cumple con lo deseado. Sin embargo y aunque la respuesta en lazo

abierto cumple, es importante establecer una estrategia de control que permitiera la conservación de la salida deseada en el tiempo.

Desafortunadamente para la aplicación, no es factible debido a que con el transcurso del tiempo y el desarrollo de las plantas al interior de la zona de cultivo, el sensor se verá expuesto a sombras generadas por las hojas y frutos, hecho poco evitable, por lo que para este desarrollo se dispone de un sistema de registro y visualización para que el control en el tiempo, sea ejecutado por un operador ocasionalmente. De esta forma el sistema de iluminación operara en lazo abierto.

Figura 47. Ubicación sensor de luz frente a plantas



Fuente: Elaboración propia

7.3 Controlador temperatura y humedad

Finalmente se presenta el diseño del controlador de las variables de mayor cuidado e importancia, ya que estas determinan en gran medida, no solo el estado y comportamiento del cultivo, sino también ofrecen la posibilidad de la presencia de invasores, es decir plagas que puedan tomar provecho de las condiciones ambientales al interior de la granja para reproducirse y perjudicar al cultivo. Algunos grados centígrados y porcentaje de humedad por fuera del rango de trabajo deseado puede ocasionar la presencia no deseada de plagas, por este motivo es también muy importante efectuar un buen control sobre estas variables.

Como se mencionó anteriormente en la definición de las variables, la respuesta de estas variables es lenta, para la aplicación y el desarrollo del control de temperatura y Humedad es recomendado que la medición se realice preferiblemente de manera frecuente. Para el desarrollo de estos controladores se considera realizar el muestreo de las señales, aproximadamente cada minuto y medio, tiempo en el cual se puede percibir algún cambio en el ambiente de la zona de cultivo.

El tipo de controlador a desarrollar para cada una de las variables en cuestión es un controlador difuso o conocido también como Fuzzy ya que este tipo de controlador presenta grandes ventajas en relación a otras técnicas de control tradicional, tales como: La no dependencia de un modelo matemático para determinar el comportamiento del sistema a controlar, sin embargo se apoya en estas para dar un mejor resultado.

Para el monitoreo y control de esta variable analógica, la temperatura, puede hacerse uso de distintos instrumentos y/o sensores que permitan su adquisición, uno de ellos es el DHT11. Este dispositivo integra un sensor de temperatura y humedad, la respuesta del módulo es por comunicación serial y su rango de operación es limitado, sin embargo, para la aplicación y considerando su salida analógica, respuesta lineal, bajo consumo de energía y favorable costo se hace uso del sensor LM35, ver figura 50.

Figura 48. Sensor de temperatura



Fuente: Sensor de temperatura. [en línea]. [Consultado en Abril 2015]. Disponible en internet: <http://www.ti.com/product/lm35>

Para realizar una correcta medición de la temperatura de la granja o zona de cultivo se han dispuesto 4 sensores LM35 de manera vertical, espaciados cada 20 cm entre ellos, con lo que cubren una distancia vertical de 80 cm, considerando que la altura máxima de la granja es de 90 cm. Cada sensor capta un valor de temperatura correspondiente al área o zona de medición, por lo que para determinar el valor de la temperatura real de la zona de cultivo se diseña un algoritmo en lenguaje C que permite calcular la temperatura promedio e identificar por medio del microcontrolador en caso de falla, alguno de los sensores defectuosos, de esta forma se pueden identificar los sensores en buen estado y contar con estos para realizar la operación del cálculo del promedio, es decir la suma de los valores individuales de temperatura captados dividido el número de sensores en buen estado. En las siguientes imágenes se puede apreciar los mensajes que se pueden visualizar en el equipo.

Figura 49. Mensajes de falla, censado de temperatura, a) Sensor 2 falló, b) Varios sensores presentan falla

a)



b)



Fuente: Elaboración propia

Considerando la respuesta lineal del sensor LM35, cuya sensibilidad está dada por $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, a continuación se presenta el actuador y el diseño del controlador que permite efectuar el control.

El actuador es una turbina, ventilador sin escobillas alimentado por tensión directa de 12 W de potencia, este se puede visualizar en la figura 52.

Figura 50. Actuador para el control de la temperatura

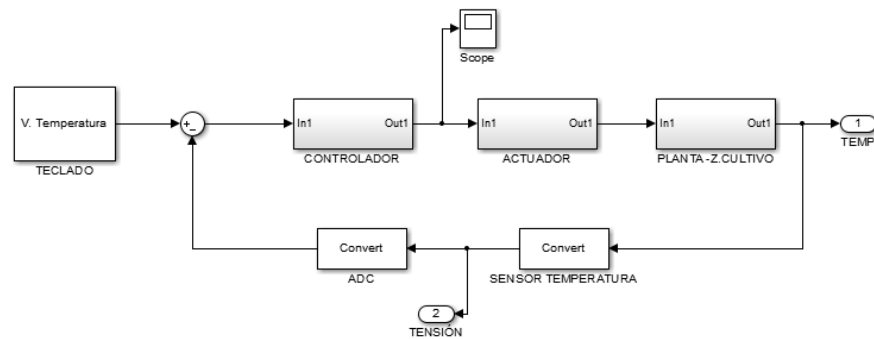


Fuente: SensBlow fan. [en línea]. [Consultado el 25 de mayo de 2015]. Disponible en internet: <http://www.dhresource.com/0x0s/f2-albu-g1-M01-2E-94-rBVaGVSjZGiAAIP-AADuEJQF8-E325.jpg/delta-sensblow-12032-12v-1-1a-12cm-turbo.jpg>

Conociendo el comportamiento de la granja desde la experiencia y de las condiciones ambientales al exterior, se considera el uso de ventiladores y rociadores para actuar y modificar a deseo el valor de esta variable analógica.

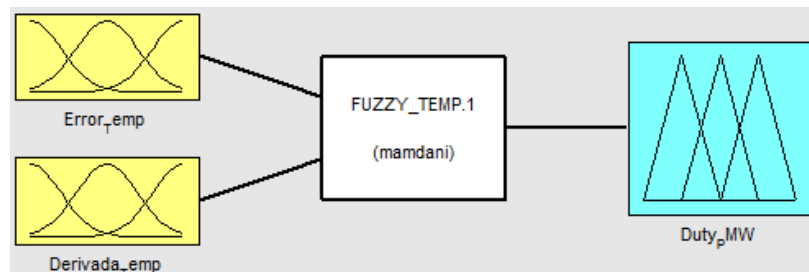
A continuación se presenta el diseño del controlador de temperatura partiendo de los 4 elementos esenciales que componen a un controlador Fuzzy. Ver las siguientes imágenes.

Figura 51. Lazo de control Temperatura



Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Esquema del controlador Fuzzy – Temperatura



Fuente: Elaboración propia

Como se pudo apreciar en la figura anterior, el controlador Fuzzy de temperatura, está compuesto por 2 entradas, un bloque lógico de control y su respectiva salida.

Las entradas representan el error actual y la derivada del error actual, estas permiten conocer el error al instante y la tendencia o comportamiento futuro del error, de esta manera se puede tomar acciones de manera más rápida.

Es importante que la ganancia de la derivada del error no sea muy grande, ya que el comportamiento de la variable a controlar es lenta y pasos muy grandes, podrían hacer oscilatorio el sistema, es decir fluctuación de temperatura en rangos amplios.

Considerando al error como la entrada al controlador, un error negativo, indica que la temperatura actual de la zona de cultivo es mayor a la temperatura deseada, por su parte un error positivo, indica todo lo contrario, la temperatura de la zona de cultivo es menor al valor de temperatura deseada y si por lo contrario el error es cero, esto indica que el valor de temperatura actual es igual al valor deseado.

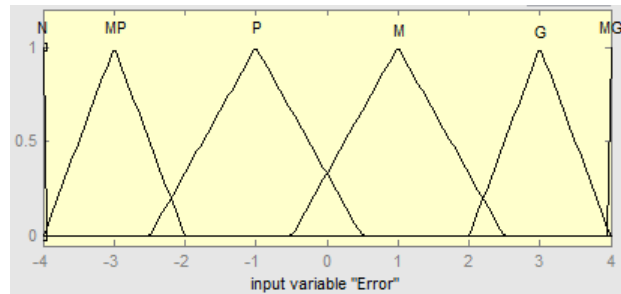
Una derivada del error negativa indica que la temperatura actual está decreciendo, una derivada positiva que la temperatura actual está creciendo y una derivada del error con valor a cero, indica que la temperatura actual tiende a igualar el valor deseado. Por lo anterior el rango de trabajo deseado de la temperatura estará entre 20 y 25°C, lo que nos da un universo discurso o conjunto de posibles datos desde -4 hasta 4, tanto para el error como para su derivada y desde 0 hasta 1023 para la salida del controlador que se ve representada por el ciclo útil de la señal PWM.

Definidas las variables del universo discurso continuo y empleando la lógica Fuzzy, es necesario definir las categorías e etiquetas que corresponden de manera lingüística a una palabra cotidiana que representa la percepción de un rango de valores de las variables definidas anteriormente.

De esta manera para las entradas, que corresponden al comportamiento del error y la derivada del error, las etiquetas son: Muy negativo (MN), negativo (N), negativo deseado (ND), positivo deseado (PD), positivo (P) y muy positivo (MP).

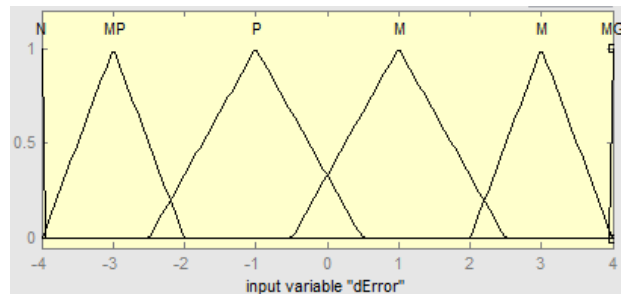
Para la salida, las etiquetas son: Nada (N), muy pequeño (MP), pequeño (P), medio (M), grande (G) y muy grande (MG). Estas hacen relación al valor del ciclo útil del PWM que se aplica sobre el actuador. En las siguientes imágenes se pueden ilustrar las etiquetas sobre las funciones de pertenencia de las entradas y la salida.

Figura 53. Función de pertenencia – Error temperatura



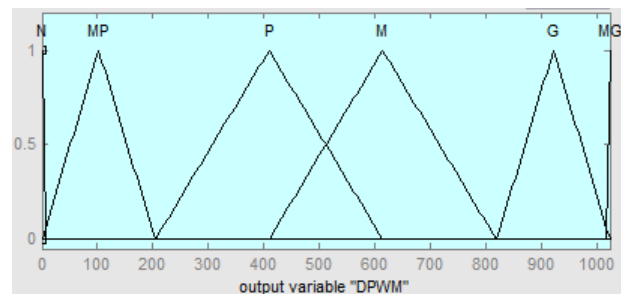
Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Función de pertenencia – Derivada error temperatura



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Función de pertenencia – Salida temperatura



Fuente: Elaboración propia

Las funciones de pertenencia seleccionadas, la trapezoide y triangular, fueron seleccionadas debido a su gran funcionalidad, rápida respuesta, y fácil implementación en un microcontrolador.

La lógica del controlador Fuzzy fue elegida de tipo Mamdani, ya que las entradas como las salidas, son definidas como conjuntos difusos, como se pudo apreciar anteriormente, lo que permite el uso de información lingüística para describir el problema.

El siguiente paso en el diseño del controlador es generar la base de reglas a partir del conocimiento intuitivo del comportamiento de la planta. Con este propósito, se analiza cuál es la acción de control más adecuada a partir del análisis del estado real de la planta, el resultado de este análisis se representa por medio de las etiquetas lingüísticas del error y de la derivada del error. Las posibles acciones de control sobre la planta resultan al realizar todas las posibles combinaciones entre las etiquetas lingüísticas de las variables de entrada.

Para su fácil construcción, se genera una matriz que muestra estas combinaciones. En las filas se encuentran las etiquetas lingüísticas del error y en las columnas se manejan las etiquetas lingüísticas de la derivada del error. En la intersección de una fila y una columna se establece el valor deseado de la acción de control usando las etiquetas lingüísticas para esta variable. A continuación se presenta la matriz de relación entre variables.

Tabla 3. Matriz de relación controlador de temperatura

Reglas		Derivada Error Temperatura					
		MN	N	ND	PD	P	MP
Error Temperatura	MN	MG	MG	MG	G	G	M
	N	G	G	M	M	P	P
	ND	P	MP	MP	MP	N	N
	PD	N	N	N	N	N	N
	P	N	N	N	N	N	N
	MP	N	N	N	N	N	N

Fuente: Elaboración propia

A partir de la matriz se escriben las reglas que darán vida al controlador. Para este caso de acuerdo al número de etiquetas descritas, se generan 36 diferentes reglas y por medio del software de simulación MATLAB se calculan las salidas correspondientes para cada una de las condiciones vistas en la matriz, de esta forma se facilita la implementación del controlador en el microcontrolador.

Con los valores arrojados por el software de simulación se diseña una tabla, que permite obtener el valor para cada condición, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

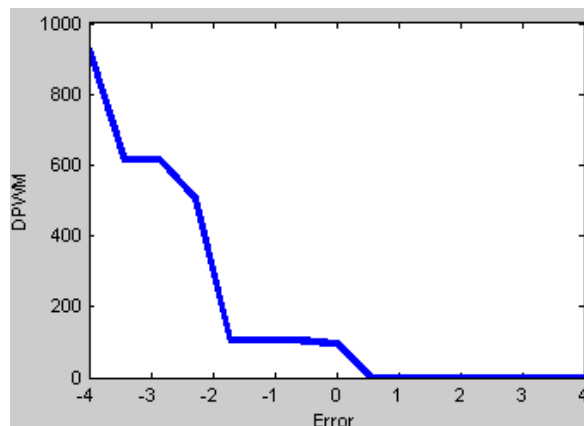
Tabla 4. Look up table controlador de temperatura

Look Up Table		Derivada Error Temperatura								
Error Temperatura	#	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
	-4	1023	1023	1023	1023	927	921	921	921	614
	-3	921	921	614	614	614	614	614	409	409
	-2	409	102	102	102	102	102	102	0	0
	-1	409	102	102	102	102	102	102	0	0
	0	397	96	96	96	96	96	96	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

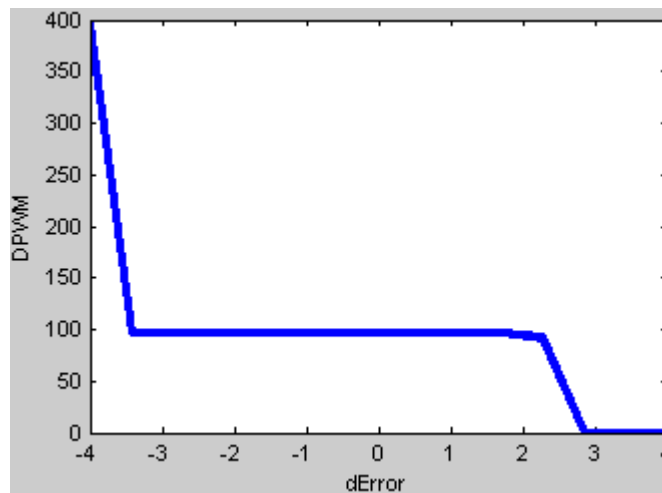
Representados en números, que describen el valor del ciclo útil que tendrá el PWM para ser aplicado a los actuadores, que físicamente se representa en un valor de corriente, es el resultado del controlador Fuzzy para cuando las entradas son combinadas como se observó en la tabla anterior. En las siguientes imágenes se presenta las respuestas del controlador.

Figura 56. Respuesta frente al Error de la temperatura como entrada



Fuente: Elaboración propia

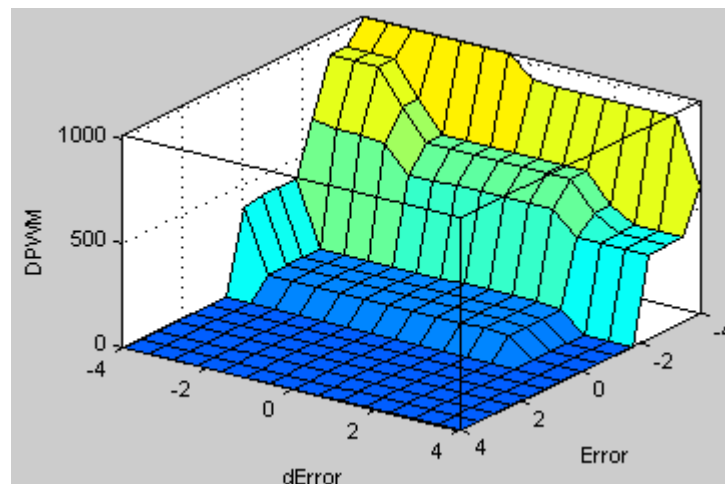
Figura 57. Respuesta frente a la Derivada del Error de la temperatura como entrada



Fuente: Elaboración propia

Si se hace un barrido por los posibles valores del error y la derivada del error, y se calcula la acción de control generada, se puede obtener una superficie tridimensional como se observa a continuación, donde se puede observar la no linealidad del sistema.

Figura 58. Respuesta relación de entradas controlador de temperatura



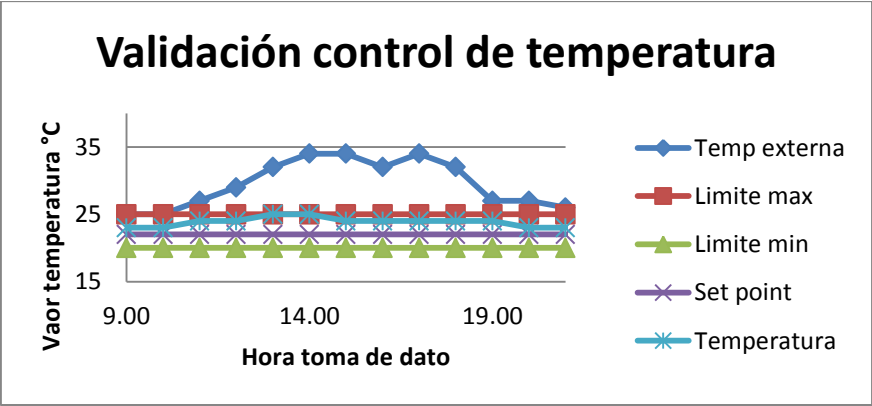
Fuente: Elaboración propia

Para validar el funcionamiento del controlador diseñado en la granja vertical construida, se realizaron varios experimentos, donde se pretendía seguir la referencia.

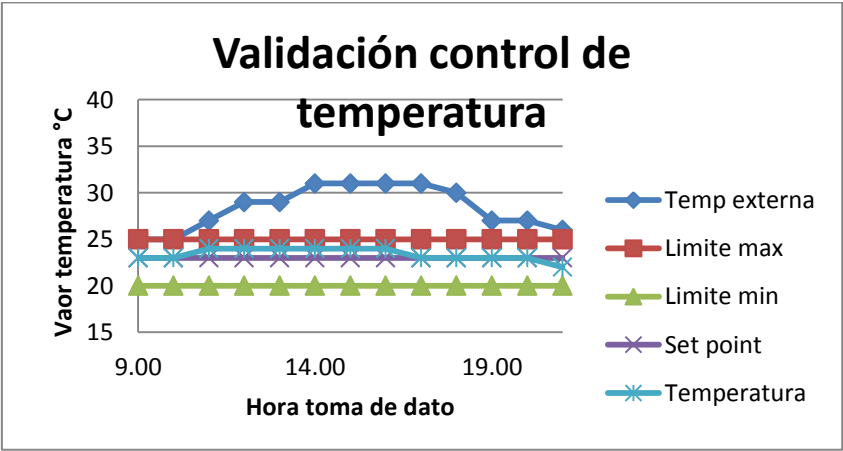
Dentro del experimento de validación del control de temperatura, se tuvo en cuenta las condiciones medio ambientales externa. A continuación se presenta la respuesta de los experimentos. La toma de datos, se realizó en un periodo igual a 12 horas y las gráficas muestran la variación de la temperatura al interior y exterior de la zona de cultivo dentro del periodo de tiempo mencionado. El resultado del experimento de validación se puede ver en la figura 61.

Figura 59. Grafica de validación del control acción temperatura, a) día 1, b) día 2

a)



b)



Fuente: Elaboración propia

Para el diseño del controlador de humedad, se aplicó la misma técnica para el desarrollo del controlador de temperatura. Uno de los sensores pre seleccionado para el monitoreo y control de la variable de humedad es el SHT71. Este dispositivo integra un sensor de temperatura y humedad, la respuesta del módulo es rápida por comunicación serial y su rango de operación es muy bueno, sin embargo, su costo es muy elevado. Por lo anterior, se usó del sensor HIH 4000, de baja tensión de operación, respuesta analógica y rápida.

Figura 60. Sensor de Humedad

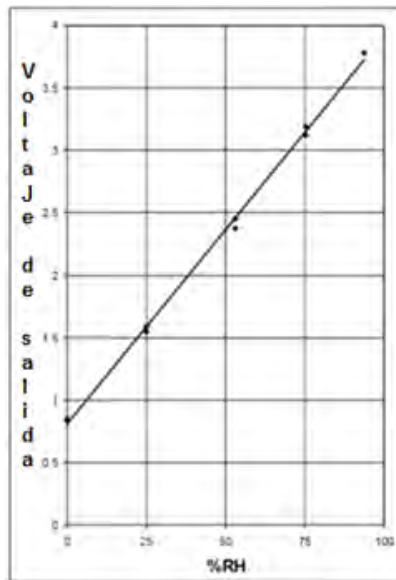


Fuente: Humidity sensors. [en línea]. [Consultado en Mayo 2015]. Disponible en internet: <http://www.sigmaelectronica.net/manuals/hih-4000.pdf>

A continuación se presenta la figura que demuestra la respuesta del sensor y la función de salida.

$$\%RH = \frac{V_{out}-0,958}{0,03068} \quad (9)$$

Figura 61. Respuesta sensor de Humedad



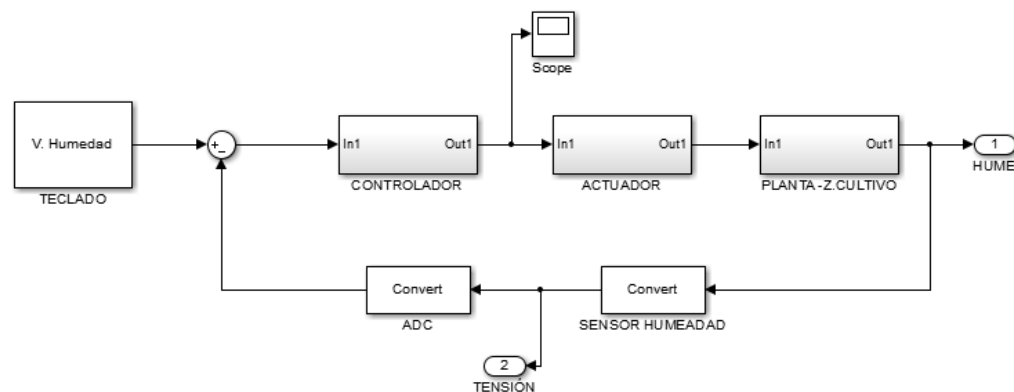
Fuente: Figura elaborada a partir de Humidity sensors. [en línea]. [Consultado en Mayo 2015]. Disponible en internet: <http://www.sigmaelectronica.net/manuals/hih-4000.pdf>

A diferencia del monitoreo de la temperatura, donde se usan varios sensores, debido a su costo favorable, para el monitoreo de la humedad solo se usa un solo sensor, esto no solo debido a su costo, sino también a que la humedad es una variable más estable, homogénea en la zona de cultivo debido al pequeño tamaño de la misma y en algunos casos influenciada por las condiciones externa de la granja ya que al ventilar aire desde afuera de la granja para controlar la temperatura en la zona de cultivo se controla indirectamente esta variable, ya que las condiciones externas de humedad están normalmente en el rango de humedad deseada, sin embargo no en el valor de mejor operación, por este motivo se diseña un controlador capaz de hacerlo. A continuación se presentan los esquemas de control y controlador diseñado.

El rango de operación deseado de la humedad relativa es entre 50 y el 80 por ciento, rango donde las plantas pueden desarrollarse de manera correcta.

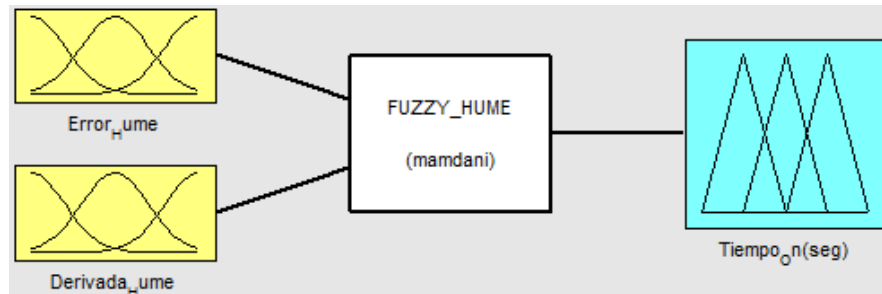
El actuador utilizado para efectuar la acción de control de humedad deseada es el mismo utilizado en el control de pH, es decir una bomba sumergible que para este caso opera como rociador por lo que no se describe nuevamente.

Figura 62. Lazo de control Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 63. Esquema del controlador Fuzzy – Humedad



Fuente: Elaboración propia

Como se pudo apreciar en la figura anterior, el controlador Fuzzy de humedad, está compuesto por 2 entradas, un bloque lógico de control y su respectiva salida.

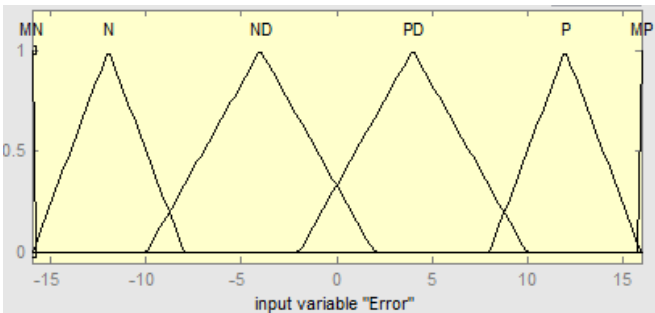
Las entradas representan el error actual y la derivada del error actual, estas permiten conocer el error al instante y la tendencia o comportamiento futuro del error, de esta forma se puede tomar acciones de manera más rápida, como en el controlador de la temperatura.

Un error negativo, indica que la humedad actual de la zona de cultivo es mayor a la humedad deseada, por su parte un error positivo, indica todo lo contrario, la humedad de la zona de cultivo es menor al valor de humedad deseada y si por lo contrario el error es cero, eso indica que el valor de humedad actual es la deseada.

Por lo anterior el rango de trabajo deseado de la humedad estará entre 50 y 80 por ciento, lo que nos da un universo discurso desde -16 hasta 16, tanto para el error como para su derivada y desde 0 hasta 20 segundos en el encendido del actuador, es decir la salida del controlador.

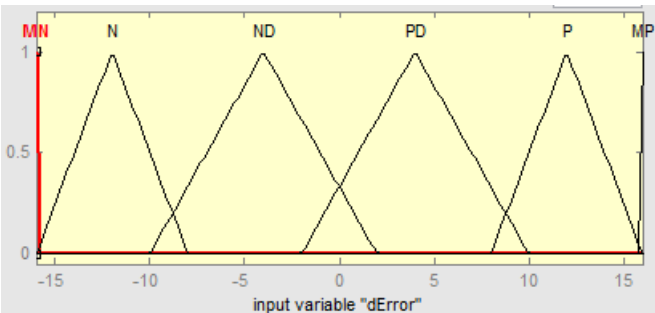
Definidas las variables de nuestro universo discurso continuo y empleando la lógica Fuzzy, es necesario definir las categorías e etiquetas que corresponden de manera lingüística a una palabra cotidiana que representa la percepción de un rango de valores de las variables definidas anteriormente, pero como se manejaron las mismas que en el diseño del controlador de temperatura, no serán mencionadas nuevamente, en las siguientes imágenes se pueden observar las funciones de pertenencias descritas para las entradas y la salida.

Figura 64. Función de pertenencia – Error humedad



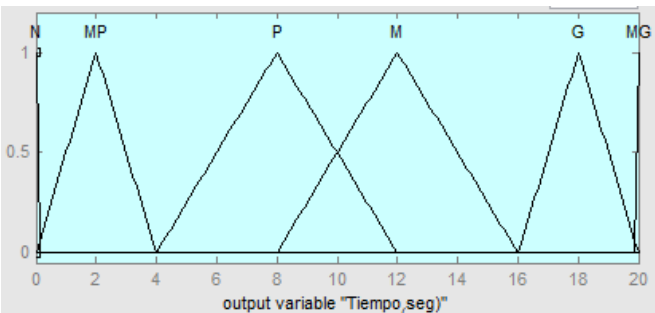
Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Función de pertenencia – Derivada error humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Función de pertenencia – Salida humedad



Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso en el diseño del controlador es generar la base de reglas a partir del conocimiento intuitivo del comportamiento de la planta. Con este propósito, se analiza cuál es la acción de control más adecuada a partir del análisis del estado real de la planta, el resultado de este análisis se representa por medio de las etiquetas lingüísticas del error y de la derivada del error. Las posibles acciones de control sobre la planta resultan al realizar todas las posibles combinaciones entre las etiquetas lingüísticas de las variables de entrada.

Para su fácil construcción, se genera una matriz que muestra estas combinaciones. En las filas se encuentran las etiquetas lingüísticas del error y en las columnas se manejan las etiquetas lingüísticas de la derivada del error. En la intersección de una fila y una columna se establece el valor deseado de la acción de control usando las etiquetas lingüísticas para esta variable. A continuación se presenta la matriz de relación entre variables.

Tabla 5. Matriz de relación controlador de humedad

Reglas		Derivada Error Humedad					
		MN	N	ND	PD	P	MP
Error Humedad	MN	N	N	N	N	N	N
	N	N	N	N	N	MP	MP
	ND	N	N	N	N	P	P
	PD	MP	MP	MP	MP	P	P
	P	P	P	M	M	G	G
	MP	G	G	MG	MG	MG	MG

Fuente: Elaboración propia

A partir de la matriz se escriben las reglas que darán vida al controlador. Para este caso de acuerdo al número de etiquetas descritas, se generan 36 diferentes reglas y por medio del software de simulación MATLAB se calculan las salidas correspondientes para cada una de las condiciones vistas en la matriz, de esta forma se facilita la implementación del controlador en el microcontrolador.

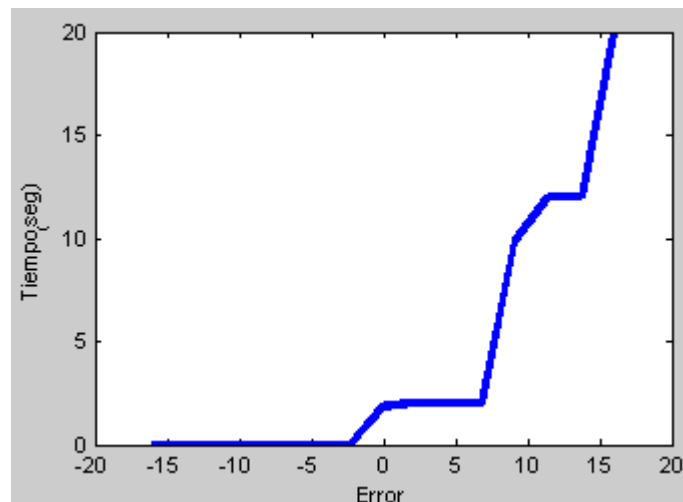
Tabla 6. Look up table matriz de relación controlador de humedad

Look Up Table		Derivada Error Humedad								
Error Humedad	#	-16	-12	-8	-4	0	4	8	12	16
	-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-12	0	0	0	0	0	0	0	2	2
	-8	0	0	0	0	0	0	0	8	8
	-4	0	0	0	0	0	0	0	8	8
	0	2	2	2	2	2	2	2	8	8
	4	2	2	2	2	2	2	2	8	8
	8	2	2	2	2	2	2	2	8	8
	12	8	8	12	12	12	12	12	18	18
	16	18	18	20	20	20	20	20	20	20

Fuente: Elaboración propia

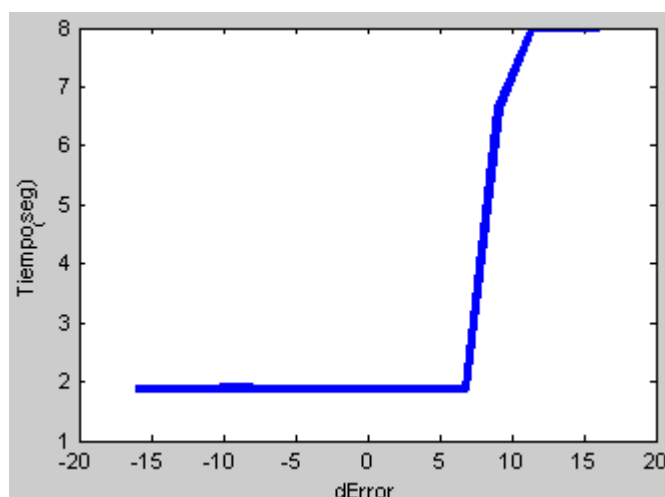
Representados en números, que describen el tiempo que permanece encendido el rociador, es el resultado del controlador Fuzzy para cuando las entradas son combinadas como se observa en la tabla anterior. En las siguientes imágenes se presentan las respuestas del controlador.

Figura 67. Respuesta frente al Error de la humedad como entrada



Fuente: Elaboración propia

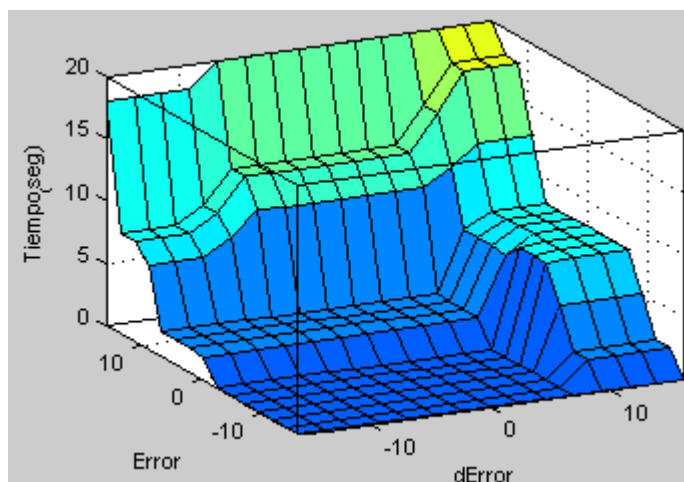
Figura 68. Respuesta frente a la Derivada del Error de la temperatura como entrada



Fuente: Elaboración propia

Si se hace un barrido por los posibles valores del error y la derivada del error, y se calcula la acción de control generada, se puede obtener una superficie tridimensional como se observa a continuación, donde se puede observar la no linealidad del sistema.

Figura 69. Respuesta relación de entradas controlador de humedad



Fuente: Elaboración propia

Para validar el funcionamiento del controlador diseñado en la granja vertical construida, se realizaron varios experimentos, donde se pretendía seguir la referencia.

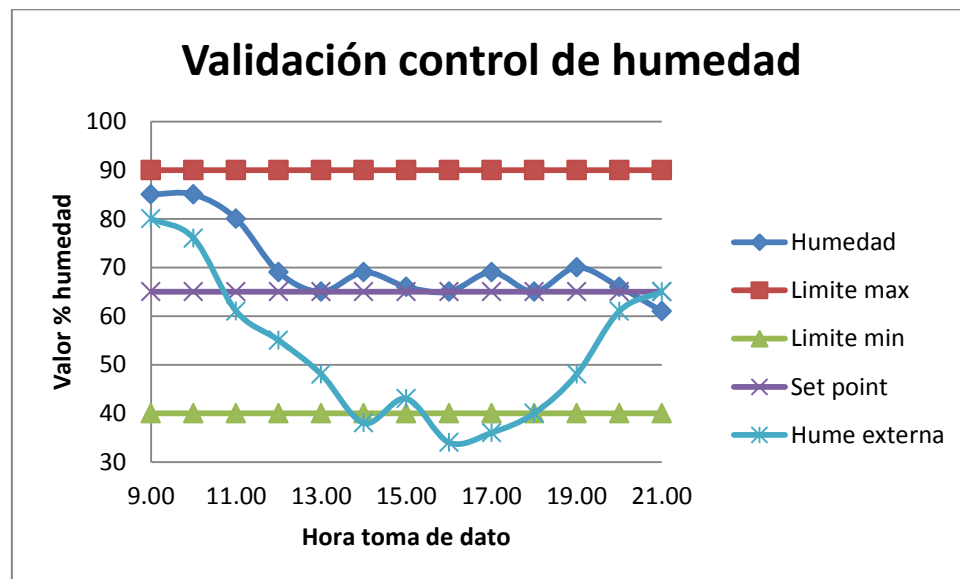
De igual forma como en al grafica de validación del controlador de temperatura, se contempla el registro de la variable ambientalmente externa.

En la figura 72 se puede apreciar el comportamiento de la humedad al interior de la zona de cultivo. Al igual que en la respuesta del controlador de temperatura, la humedad al interior de la zona de cultivo se encuentra dentro de los márgenes establecidos y aunque presenta unas pequeñas oscilaciones sobre el valor de referencia establecido, esto no representa mayor inconveniente.

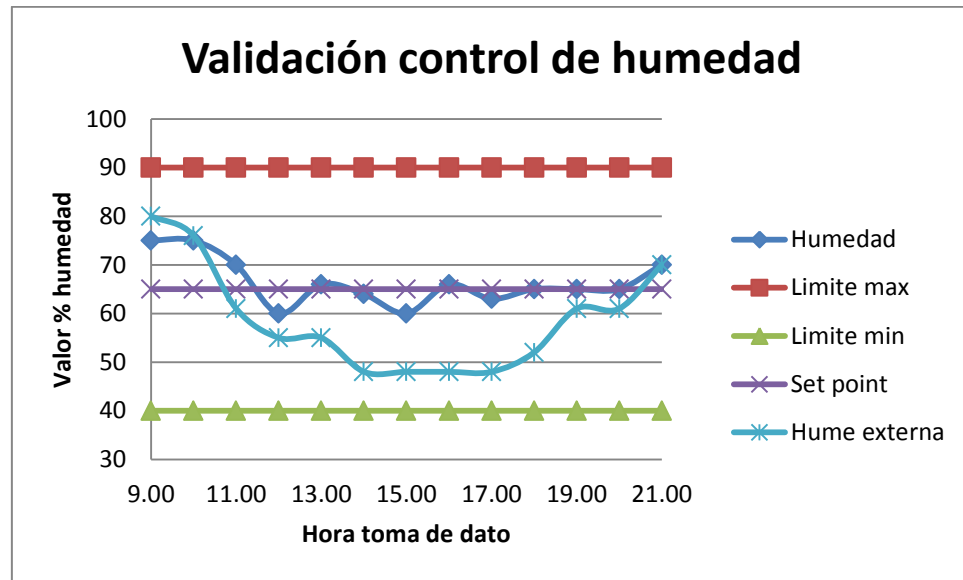
A continuación se presentan la respuesta de los experimentos del controlador.

Figura 70. Grafica de validación del control acción humedad, a) día 1 y b) día 2)

a)



b)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se presentan algunas imágenes relacionadas con la implementación y operación de la granja vertical.

Figura 71. Implementación y operación de la granja vertical



Fuente: Elaboración propia

8 CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema de control no solo permite mejoras en los procesos en los que este interviene, sino que también permite la automatización de tareas de manera más confiable lo que suma para el cumplimiento de los requerimientos del diseño.

De esta manera un sistema de control incide positivamente en maximizar el proceso de fotosíntesis y la capacidad productiva de las plantas comestibles porque actúa directamente sobre los problemas que presentan los cultivos durante el periodo de desarrollo, como también en la operación de manera indirecta de la granja.

Tales problemas como estrés por calor moderado y la deshidratación afectan el desarrollo de las plantas si no son controladas, permitiendo fallas fisiológicas y morfológicas, por mencionar algunas. Así, manteniendo los niveles de temperatura, humedad, pH e intensidad de luz en valores muy cercanos a los deseables se logra un desarrollo saludable de las plantas o del cultivo. Si los valores deseables se mantienen en el tiempo es visible como la capacidad de producción del cultivo se mejora.

Estas mejoras hacen relación directa a la rapidez de crecimiento y floración (desarrollo), en comparación a un cultivo tradicional, expuesto al aire libre, donde no es fácil conservar los niveles de las variables más importantes cercanos a los deseables.

Sin embargo se recomienda que el proceso de germinación se realice por fuera de la zona de cultivo de la granja vertical, ya que es más fácil el desarrollo de las semillas, ya que por el método de riego y el sustrato utilizado se dificulta la conservación de la temperatura, humedad y agua. Una vez germinada la planta, entre 8 a 15 días después, estas pueden ser trasplantadas.

Durante el periodo de toma de datos (15 días), fue necesario tan solo usar 40 litros de agua, con posibilidad de ser usada más tiempo, sin embargo por salubridad se realizó el cambio. Así el consumo de agua en las granjas verticales tiene un ahorro significativo, gracias a la técnica de la hidroponía como medio de alimentación y desarrollo, lo que difícilmente es posible de realizar en un cultivo sembrado sobre suelo. El monitoreo y control de la calidad del agua y solución de nutrientes supone la única acción a tomar, lo que hace rentable disponer de esta técnica y control para un cultivo.

Pero todo lo anterior no pudo haber sido posible sin el diseño electrónico que comprendió la programación de un microcontrolador dsPIC 30F4011. Este microcontrolador de 16 bits respondió de muy buena forma ya que ejecuta correctamente las instrucciones descritas en él ante el desarrollo de todo el programa escrito en lenguaje C, para ejecutar las acciones de captura de información por medio del usuario y sensores, como también las acciones de control programadas en él.

A través de los resultados obtenidos con los controladores desarrollados, se pudo evidenciar la correcta operación de estos al ser implementados en el microcontrolador.

Esta correcta operación hace relación a la selección del dispositivo y diseño del controlador FUZZY para con las variables de temperatura y humedad. Aunque el error en muchos casos es mayor a cero, sin superar los márgenes límites establecidos y las variables oscilan alrededor del valor de referencia, esta estrategia es muy práctica y viable para aquellos sistemas de difícil caracterización y cómoda descripción verbal ya que representa un muy bajo porcentaje de carga computacional en el microcontrolador. Tal fue la buena respuesta del microcontrolador que tan solo fue necesario el uso del 30 % de la RAM y del 50 % de la memoria ROM.

Aunque este tipo de dispositivos operan muy bien, presentan algunas limitaciones que pueden afectar la comodidad del desarrollo de un proyecto de gran tamaño, debido a problemas relacionados con la tensión de alimentación y otros elementos que puedan estar conectados al momento de su programación. Ya que si se desea reprogramar el microcontrolador en el sitio de operación sin desconectar los elementos que compartan alimentación con él, al momento de programar nuevamente el micro, se presentara una falla por tensión. Por tal motivo siempre es necesario desconectar todos los dispositivos electrónicos diferentes al microcontrolador que tengan alguna comunicación con tierra, en la alimentación, para poder reprogramar el dispositivo en el lugar de funcionamiento.

Por lo que sugiere este fenómeno realizar algún tipo de aislamiento electrónico ya sea óptico o magnético para evitar este fenómeno molesto.

Una etapa muy importante del proyecto, comprendió el desarrollo de un sistema de iluminación LED para suplir la ausencia de luz solar en el cultivo, en esta etapa, tal como el diseño de la lámpara lo era, la fuente capaz de entregar toda la energía que esta requiere para su correcta operación era una fuente conmutada de topología BOOST. Una fuente elevadora de tensión de 12 a 15 V, necesaria para encender cada una de las columnas de LEDs dispuestas como lámpara para el cultivo. Para controlar la tensión de los 15 V de salida de la fuente, se utilizó el controlador SG3524 y como el fabricante sugiere, se realizó el montaje del convertidor sin éxitos. Esto debido a que el ciclo útil necesario para realizar la elevación de tensión es muy pequeño, alrededor del 20%, lo que dificultaba enormemente la acción de control.

Así que para corregir la incapacidad de la fuente de mantener la energía a entregar para la carga máxima a la frecuencia de conmutación de 91 Hz, fue necesario modificar el compensador del controlador, ajustable por medio de un circuito RC dispuesto en su configuración.

Por lo que modificando esta relación, es decir, haciendo más lento la respuesta del controlador, fue posible que el convertidor para la tensión de salida deseada, pudiera entregar toda la energía necesaria para la lámpara LED de manera estable, sin esta modificación, el convertidor, no fue posible de mantener la energía de salida deseada.

Uno de los mayores inconvenientes que se presentó en la operación del sistema fue la alta temperatura que se genera al interior del equipo desarrollado, esto como consecuencia de los dispositivos de conmutación que encienden los LEDs. Aunque se usan extractores, estos no son suficientes debido al calor generado por los transistores que operan con disipación y una resistencia interna baja, lo que ocasiona que para mantener la corriente que los LEDs requieren, los transistores consuman mayor potencia, lo que se traduce en mayor calor. Por consiguiente para una mejor operación del equipo, es necesario contar con una mejor disipación, los disipadores utilizados, no aportaban correctamente con este fin, especialmente en la lámpara LED, ya que por el diseño de la misma, no fue posible disponer de un disipador. Sin embargo previa consideración la placa que soporta los dispositivos LEDs contempla cientos de huecos que permiten el paso del aire a través de sí, para la refrigeración, sin estos es posible que los dispositivos pudieran haber fallado.

También es válido concluir que la topología BOOST como circuito electrónico capaz de elevar la tensión del banco de baterías para alimentar la lámpara LED, no es la mejor estrategia debido a que por el comportamiento natural del sistema de iluminación el consumo energético es muy grande, esto debido a que el convertidor requiere una alta corriente para poder entregar la tensión deseada ya que la eficiencia del convertidor no es muy buena, solo hasta que la carga, es decir la lámpara, alcanza valores altos de consumo energético. Por tal motivo es prudente rediseñar la lámpara LED para considerar otra estrategia de alimentación, que evite un circuito elevador para alimentar la lámpara.

Cabe mencionar que este tipo de desarrollos, son un acierto desde el punto de vista de la investigación y desarrollo de nuevas posibilidades de crecimiento, no solo tecnológico sino también de la forma como de manera correcta la tecnología existente, puede ser aplicada con éxito en otras áreas, tal vez, poco exploradas. Sin embargo el desarrollo por su esencia, del alto contenido de tecnología presenta un elevado costo de inversión para su puesta en operación.

BIBLIOGRAFIA

BROTOSUDARMOA, Tatas et al. The Light Reactions of Photosynthesis as a Paradigm for Solar Fuel Production. [en línea]. En: Energy Procedia, 2014, vol. 47. 890 p. [consultado el 10 de octubre 2014]. Disponible en internet: http://ac.els-cdn.com/S1876610214002422/1-s2.0-S1876610214002422-main.pdf?_tid=92d8142e-773f-11e5-844f-00000aabb0f02&acdnat=1445355243_6c860114b50496331129732a4a00d515

CAMACHO, Jairo. Gran Consultor Educar Enciclopedia Estudiantil. Bogotá: Educar Cultural y Recreativa, 1999. 1069 p.

CARRUTHERS, S. Hydroponic Gardening, 3 ed. Australia: Lothian, 1993. 64. p

Chlorophyll & other photosentitives [en línea]. United kingdom [Consultado el 11 octubre 2014]. Disponible en internet: <http://www.ledgrowlightshq.co.uk/chlorophyll-plant-pigments/>

COGDELL, Richard. Photosynthesis. [en línea]. En: New Scientist, 2013, Vol. 217. p. 8 [consultado el 10 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?vid=1&sid=faad5080-95c0-4240-a243-ca2a1174a1b9%40sessionmgr110&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=85284866&db=aph>

Diseases and management of crops under protected cultivation. [en línea]. Pantnagar, 2012 [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: <http://www.gbpuat.ac.in/26%20CAFT%20Proceeding.pdf#page=150>

Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar [en línea]. Beijing, 2014. [Consultado el 15 de octubre de 2014]. Disponible en internet: <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/14/111>

How do I manage EC (electrical conductivity)? [en línea]. hydroponics [Consultado en Octubre 2014]. Disponible en internet: <http://www.hydroponics.com.au/how-do-i-manage-ec-electrical-conductivity/>

Hydroponics. [en línea]. [Consultado el 20 de abril de 2015]. Disponible en internet: http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/hydro_agriculture.html

Plant Factory / Vertical Farming Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2014-2020. [en línea] Kent: Report Buyer, 2014 [consultado el 4 de mayo de 2015] Disponible en internet: <https://www.reportbuyer.com/product/2107872/plant-factory-vertical-farming-market-shares-strategies-and-forecasts-worldwide-2014-2020.html>

Progressive Plant Growing Has Business Blooming. [en línea]. [Consultado el 20 abril de 2015]. Disponible en internet: http://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aeroponic_plants.html

SINGH, D. BASU, C. MEINHARDT-WOLLWEBER, M. ROTH, B. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting [en línea]. Hannover, 2014 [Consultado en Octubre 2014]. Disponible en internet: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf>

Urban Futures 2030. [en línea]. Berlín: Heinrich-Böll-Stiftung, 2009 [consultado el 28 de junio de 2014]. Disponible en internet: <https://www.boell.de/en/2013/11/19/urban-futures-2030-urban-development-and-urban-lifestyles-future>

ZHENG, Ming. Photosynthesis. [en línea]. En: Salem Press Encyclopedia Of Science, 2015. 2 p. [Consultado el 3 de enero de 2015]. Disponible en internet: <http://ezproxy.uao.edu.co:2106/eds/detail/detail?sid=2094f9cf-a69f-4bfb-aa6c-afae8e502cf7%40sessionmgr111&vid=1&hid=113&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=89475805&db=ers>

ANEXOS

Anexo A. Microcontrolador dsPIC30F4011

dsPIC30F4011/4012 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

High Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible addressing modes
- 84 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 48 Kbytes on-chip Flash program space (16K Instruction words)
- 2 Kbytes of on-chip data RAM
- 1 Kbytes of non-volatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 30 interrupt sources
 - 3 external interrupt sources
 - 8 user selectable priority levels for each interrupt source
 - 4 processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions single cycle
- \pm 16-bit single cycle shift

Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
 - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- 2 UART modules with FIFO Buffers
- 1 CAN modules, 2.0B compliant

Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center Aligned modes
- 3 duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead-time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

MONOLITHIC PHOTODIODE AND SINGLE-SUPPLY TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER

FEATURES

- SINGLE SUPPLY: +2.7 to +36V
- PHOTODIODE SIZE: 0.090 x 0.090 inch
- INTERNAL 1MΩ FEEDBACK RESISTOR
- HIGH RESPONSIVITY: 0.45A/W (650nm)
- BANDWIDTH: 14kHz at $R_F = 1M\Omega$
- LOW QUIESCENT CURRENT: 120μA
- AVAILABLE IN 8-PIN DIP AND 8-LEAD SURFACE-MOUNT PACKAGES

APPLICATIONS

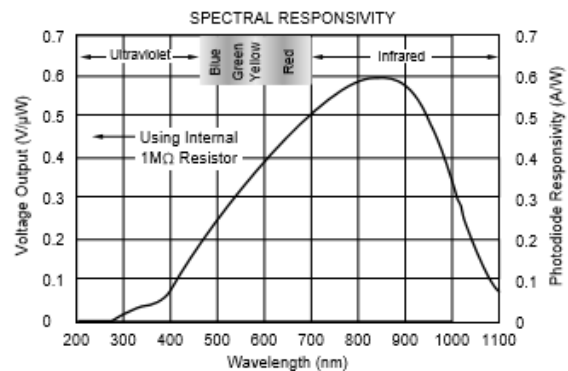
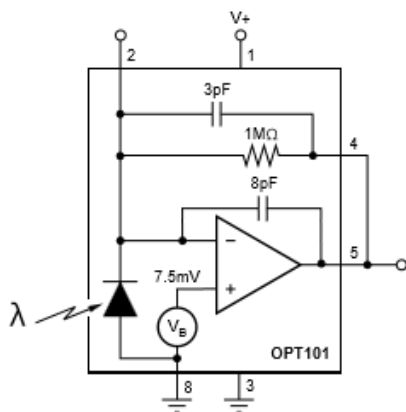
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- LABORATORY INSTRUMENTATION
- POSITION AND PROXIMITY SENSORS
- PHOTOGRAPHIC ANALYZERS
- BARCODE SCANNERS
- SMOKE DETECTORS
- CURRENCY CHANGERS

DESCRIPTION

The OPT101 is a monolithic photodiode with on-chip transimpedance amplifier. Output voltage increases linearly with light intensity. The amplifier is designed for single or dual power-supply operation, making it ideal for battery-operated equipment.

The integrated combination of photodiode and transimpedance amplifier on a single chip eliminates the problems commonly encountered in discrete designs such as leakage current errors, noise pick-up, and gain peaking due to stray capacitance. The 0.09 x 0.09 inch photodiode is operated in the photoconductive mode for excellent linearity and low dark current.

The OPT101 operates from +2.7V to +36V supplies and quiescent current is only 120μA. It is available in clear plastic 8-pin DIP, and J-formed DIP for surface mounting. Temperature range is 0°C to +70°C.



Honeywell

HIH-4000 Series

Humidity Sensors



The HIH-4000 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users. Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's linear voltage output. With a typical current draw of only 200 μ A, the HIH-4000 Series is often ideally suited for low drain, battery operated systems. Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs. Individual sensor calibration data is available.

The HIH-4000 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a competitively priced, solderable SIP (Single In-line Package). Available in two lead spacing configurations, the RH sensor is a laser trimmed, thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning. The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as wetting, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

FEATURES

- Molded thermoset plastic housing
- Linear voltage output vs %RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- High accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

TYPICAL APPLICATIONS

- Refrigeration equipment
- HVAC equipment
- Medical equipment
- Drying
- Metrology
- Battery-powered systems
- OEM assemblies

Anexo D. Sensor de temperatura

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

FEATURES

- Calibrated Directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10 mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at +25°C)
- Rated for Full –55°C to +150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates from 4 to 30 V
- Less than 60-μA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Nonlinearity Only ±¼°C Typical
- Low Impedance Output, 0.1 Ω for 1 mA Load

DESCRIPTION

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, with an output voltage linearly proportional to the Centigrade temperature. Thus the LM35 has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±¾°C over a full –55°C to +150°C temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 make interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 draws only 60 μA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a –55°C to +150°C temperature range, while the LM35C is rated for a –40°C to +110°C range (–10° with improved accuracy). The LM35 series is available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

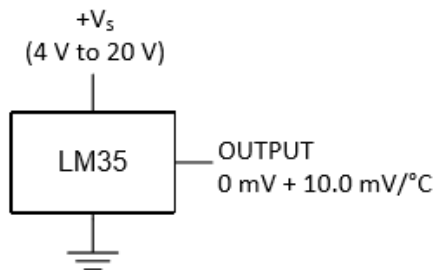
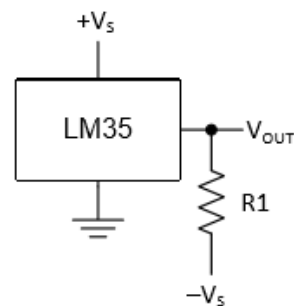


Figure 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{OUT} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

Figure 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Anexo E. Sensor de pH

PH composite electrode manual

A. Purpose

The electrode is made of PH glass electrode and a silver/silver chloride reference electrode composition, the PH measuring elements which is used to measure water solution PH value.

B. Type and main technical parameters

Electrode type	range	temperature	Zero point	Alkali deviation	PTS	Response time	Internal resistance	Repeat ability	Noise
	PH	℃	PH	mV		min	MΩ		mV
65-1	0-14	0-80	7 ± 1	<15	>98	<2	<250	<0.017	
BX-5	0-14	0-80	$7X \pm 11$	<15	>98	<2	<250	<0.017	
E-201	0-14	0-80	7 ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-201-C	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
95-1	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-900	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5

C. Precautions

1. The electrode used for the first or long set without re-use, the electrode bulb and the sand core, immersed in the 3NKCL solution activated eight hours.
2. The electrode plug should be kept clean and dry.
3. Electrode reference solution is the 3NKCL solution.
4. Measurement should be avoided staggered pollution between solutions, so as not to affect the accuracy of measurement.
5. Electrode blub or sand core is defiled which will make PTS decline, slow response. So, it should be based on the characteristics of the pollutant, adapted to the cleaning solution, the electrode performance recovery.
6. The electrode should not be long-term immersed in acid chloride solution.
7. Electrode when in use, the ceramic sand core and liquid outlet rubber ring should be removed, in order to make salt bridge solution to maintain a certain velocity.

Anexo F. LED rojo

OSLON SSL

Ceramic package - 150° radiation pattern
Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

LH CPDP



Released

Besondere Merkmale

- **Gehäusetyp:** SMT-Keramikgehäuse mit Silikonverguss und Linse
- **Typische Strahlungsleistung:** 355 mW bei 350 mA
- **Besonderheit des Bauteils:** Kompakte Lichtquelle für platzsparende Designs
- **Schwerpunktwellenlänge:** 656 nm
- **Abstrahlwinkel:** 150°
- **Technologie:** Dünnschicht InGaAlP
- **Optischer Wirkungsgrad:** 48 % bei 350 mA
- **Gruppierungsparameter:** Strahlungsleistung
- **Verarbeitungsmethode:** für SMT-Bestücktechniken geeignet
- **Lötmethode:** Reflow-Löten
- **Vorbehandlung:** nach JEDEC Level 2
- **Gürtung:** 12-mm Gürt mit 800/Rolle, ø180 mm
- **ESD-Festigkeit:** ESD-sicher bis 8 kV nach JESD22-A114-D
- **Erweiterte Korrosionsfestigkeit:** Details siehe Seite 10

Features

- **package:** SMT ceramic package with silicon resin with lens
- **typical Radiant Power:** 355 mW at 350 mA
- **feature of the device:** small size high-flux LED for slim designs
- **centroid wavelength:** 656 nm
- **viewing angle:** 150°
- **technology:** Thinfilm InGaAlP
- **optical efficiency:** 48 % at 350 mA
- **grouping parameter:** radiant power
- **assembly methods:** suitable for SMT assembly methods
- **soldering methods:** Reflow soldering
- **preconditioning:** acc. to JEDEC Level 2
- **taping:** 12-mm tape with 800/reel, ø180 mm
- **ESD-withstand voltage:** up to 8 kV acc. to JESD22-A114-D
- **Superior Corrosion Robustness:** details see page 10

Anwendungen

- Effektbeleuchtung
- Pflanzenbeleuchtung
- Ladenbeleuchtung
- Bühnenbeleuchtung
- Architekturbeleuchtung

Applications

- effect lighting
- horticultural lighting
- shoplighting
- stage lighting
- architectural lighting

2011-10-04

1

OSRAM
Opto Semiconductors



Cree® XLamp® XP-E2 LEDs



PRODUCT DESCRIPTION

The XLamp® XP-E2 LED builds on the unprecedented performance of the original XP-E by increasing lumen output up to 20% while providing a single die LED point source for precise optical control. The XP-E2 LED shares the same footprint as the original XP-E, providing a seamless upgrade path to more lumens and/or greater efficiency while shortening the design cycle for existing XP customers.

XLamp XP-E2 LEDs are the ideal choice for lighting applications where high light output and maximum efficacy are required, such as LED retrofit lamps, outdoor, portable, indoor directional,

FEATURES

- Available in white, outdoor white, 80-CRI, 85-CRI, 90-CRI white, royal blue, blue, green, PC amber, amber, red-orange & red
- ANSI-compatible chromaticity bins
- White binned at 85 °C
- Maximum drive current: 1 A
- Low thermal resistance: as low as 5 °C/W
- Wide viewing angle: 110°-135°
- Unlimited floor life at ≤ 30 °C/85% RH
- Reflow solderable - JEDEC J-STD-020C compatible
- Electrically neutral thermal path
- RoHS-compliant
- UL-recognized component

TABLE OF CONTENTS

Characteristics	2
Flux Characteristics - White	3
Flux Characteristics - Color	4
Relative Spectral Power Distribution	6
Relative Flux vs. Junction Temperature	7
Electrical Characteristics - White ..	8
Electrical Characteristics - Color ..	8
Relative Flux vs. Current - White ..	9
Relative Flux vs. Current - Color ..	9
Relative Chromaticity vs. Current and Temperature - Warm White ..	10
Typical Spatial Distribution	11
Thermal Design	12
Reflow Soldering Characteristics ..	13
Notes	14
Mechanical Dimensions	15
Tape and Reel	16

Anexo H. Controlador de tensión



LM2524D, LM3524D

www.ti.com

SNVS766E –JUNE 2008–REVISED MAY 2013

LM2524D/LM3524D Regulating Pulse Width Modulator

Check for Samples: [LM2524D](#), [LM3524D](#)

FEATURES

- Fully Interchangeable With Standard LM3524 Family
- $\pm 1\%$ Precision 5V Reference With Thermal Shut-Down
- Output Current to 200 mA DC
- 60V Output Capability
- Wide Common Mode Input Range for Error-Amp
- One Pulse per Period (Noise Suppression)
- Improved Max. Duty Cycle at High Frequencies
- Double Pulse Suppression
- Synchronize Through Pin 3

DESCRIPTION

The LM3524D family is an improved version of the industry standard LM3524. It has improved specifications and additional features yet is pin for pin compatible with existing 3524 families. New features reduce the need for additional external circuitry often required in the original version.

The LM3524D has a $\pm 1\%$ precision 5V reference. The current carrying capability of the output drive transistors has been raised to 200 mA while reducing V_{CEsat} and increasing V_{CE} breakdown to 60V. The common mode voltage range of the error-amp has been raised to 5.5V to eliminate the need for a resistive divider from the 5V reference.

In the LM3524D the circuit bias line has been isolated from the shut-down pin. This prevents the oscillator pulse amplitude and frequency from being disturbed by shut-down. Also at high frequencies (≈ 300 kHz) the max. duty cycle per output has been improved to 44% compared to 35% max. duty cycle in other 3524s.

In addition, the LM3524D can now be synchronized externally, through pin 3. Also a latch has been added to insure one pulse per period even in noisy environments. The LM3524D includes double pulse suppression logic that insures when a shut-down condition is removed the state of the T-flip-flop will change only after the first clock pulse has arrived. This feature prevents the same output from being pulsed twice in a row, thus reducing the possibility of core saturation in push-pull designs.

Connection Diagram

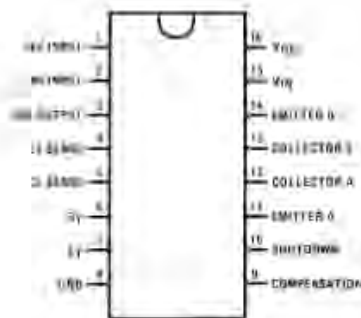


Figure 1. Top View



Shielded Power Inductors–MSS1583



- 14.8 × 14.8 mm footprint; 8.6 mm high shielded inductors
- 16 inductance values from 10 μ H to 1 mH
- Low DCR and excellent current handling

Core material Ferrite

Environment RoHS compliant, halogen free

Terminations RoHS compliant matte tin over nickel over phosphor bronze. Other terminations available at additional cost.

Weight: 3,7 – 4,4 g

Ambient temperature –40°C to +85°C with I_{rms} current, +85°C to +125°C with derated current

Storage temperature Component: –40°C to +125°C.

Tape and reel packaging: –40°C to +80°C

Resistance to soldering heat Max three 40 second reflows at +260°C, parts cooled to room temperature between cycles

Moisture Sensitivity Level (MSL) 1 (unlimited floor life at <30°C / 85% relative humidity)

Failures in Time (FIT) / Mean Time Between Failures (MTBF)

38 per billion hours / 26,315,789 hours, calculated per Telcordia SR-332

Packaging 300/13" reel; Plastic tape: 32 mm wide, 0.5 mm thick, 24 mm pocket spacing, 8.6 mm pocket depth

PCB washing Tested to MIL-STD-202 Method 215 plus an additional aqueous wash. See Doc787_PCB_Washing.pdf.

Part number ¹	Inductance ² (μ H)	DCR (Ohms) ³		SRF typ ⁴ (MHz)	I_{sat} (A) ⁵			I_{rms} (A) ⁶	
		typ	max		10% drop	20% drop	30% drop	20°C rise	40°C rise
MSS1583-103ME	10 \pm 20%	0.012	0.014	17.0	12.0	13.6	14.7	5.0	7.4
MSS1583-123ME	12 \pm 20%	0.014	0.017	14.5	11.7	13.3	14.2	4.4	6.3
MSS1583-153ME	15 \pm 20%	0.018	0.021	13.5	10.1	11.5	12.4	4.3	6.1
MSS1583-183ME	18 \pm 20%	0.020	0.023	12.0	9.2	10.5	11.2	3.9	5.5
MSS1583-223ME	22 \pm 20%	0.023	0.026	10.5	8.2	9.1	10.4	3.7	5.3
MSS1583-333ME	33 \pm 20%	0.033	0.038	8.5	7.0	7.9	8.6	3.4	4.8
MSS1583-473ME	47 \pm 20%	0.048	0.055	7.3	5.9	6.7	7.3	2.7	3.7
MSS1583-683ME	68 \pm 20%	0.061	0.070	6.0	4.7	5.5	6.0	2.5	3.4
MSS1583-104KE	100 \pm 10%	0.090	0.103	4.8	3.9	4.4	4.8	2.0	2.8
MSS1583-154KE	150 \pm 10%	0.138	0.159	3.7	3.1	3.6	3.9	1.55	2.20
MSS1583-224KE	220 \pm 10%	0.205	0.235	3.0	2.6	3.0	3.3	1.30	1.80
MSS1583-334KE	330 \pm 10%	0.300	0.345	2.7	2.0	2.3	2.5	1.00	1.45
MSS1583-474KE	470 \pm 10%	0.386	0.445	2.2	1.8	2.0	2.2	0.96	1.35
MSS1583-684KE	680 \pm 10%	0.570	0.655	1.8	1.4	1.6	1.8	0.78	1.10
MSS1583-824KE	820 \pm 10%	0.640	0.736	1.6	1.3	1.5	1.6	0.74	1.0
MSS1583-105KE	1000 \pm 10%	0.860	0.990	1.5	1.1	1.3	1.4	0.63	0.86

Anexo J. Mosfet



CSD19536KCS

SLPS485A – JANUARY 2014 – REVISED APRIL 2014

CSD19536KCS 100 V N-Channel NexFET™ Power MOSFET

1 Features

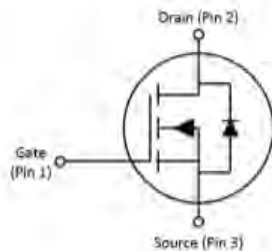
- Ultra-Low Q_g and Q_{gd}
- Low Thermal Resistance
- Avalanche Rated
- Pb-Free Terminal Plating
- RoHS Compliant
- Halogen Free
- TO-220 Plastic Package

2 Applications

- Secondary Side Synchronous Rectifier
- Motor Control

3 Description

This 100 V, 2.3 m Ω , TO-220 NexFET™ power MOSFET is designed to minimize losses in power conversion applications.



Product Summary

$T_A = 25^\circ\text{C}$		TYPICAL VALUE	UNIT
V_{DS}	Drain-to-Source Voltage	100	V
Q_g	Gate Charge Total (10 V)	118	nC
Q_{gs}	Gate Charge Gate to Drain	17	nC
$R_{DS(on)}$	Drain-to-Source On Resistance	$V_{GS} = 6\text{ V}$	2.5 m Ω
		$V_{GS} = 10\text{ V}$	2.3 m Ω
$V_{GS(th)}$	Threshold Voltage	2.5	V

Ordering Information

Device	Package	Media	Qty	Ship
CSD19536KCS	TO-220 Plastic Package	Tube	50	Tube

Absolute Maximum Ratings

$T_A = 25^\circ\text{C}$		VALUE	UNIT
V_{DS}	Drain-to-Source Voltage	100	V
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_D	Continuous Drain Current (Package limited)	150	A
	Continuous Drain Current (Silicon limited), $T_C = 25^\circ\text{C}$	259	
	Continuous Drain Current (Silicon limited), $T_C = 100^\circ\text{C}$	183	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ⁽¹⁾	400	A
P_D	Power Dissipation	375	W
T_J , T_{stg}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
E_{AS}	Avalanche Energy, single pulse $I_D = 127\text{ A}$, $L = 0.1\text{ mH}$, $R_G = 25\text{ }\Omega$	805	mJ

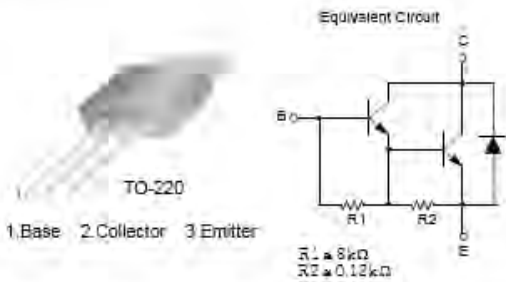
(1) Pulse duration $\leq 1\text{ ms}$, Duty cycle $\leq 1\%$



October 2008

TIP120/TIP121/TIP122
NPN Epitaxial Darlington Transistor

- Medium Power Linear Switching Applications
- Complementary to TIP125/126/127



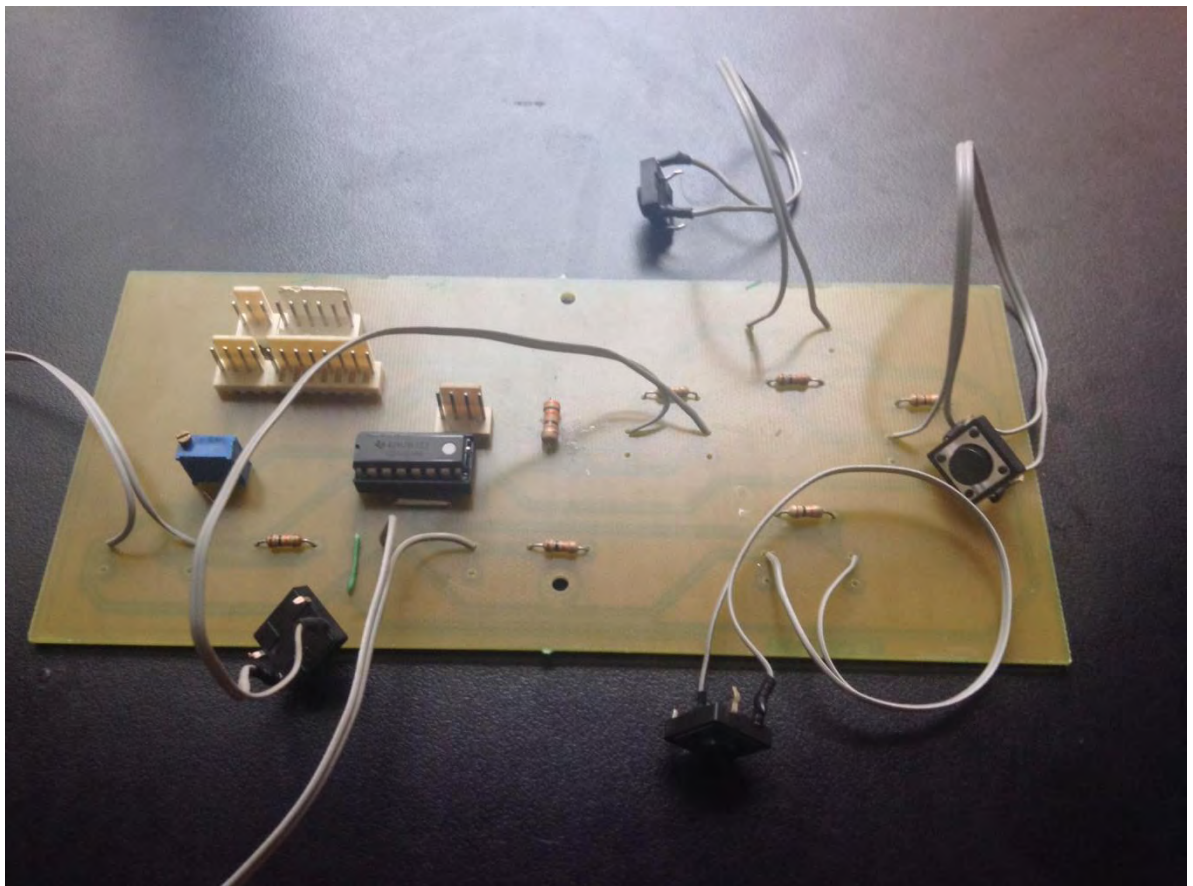
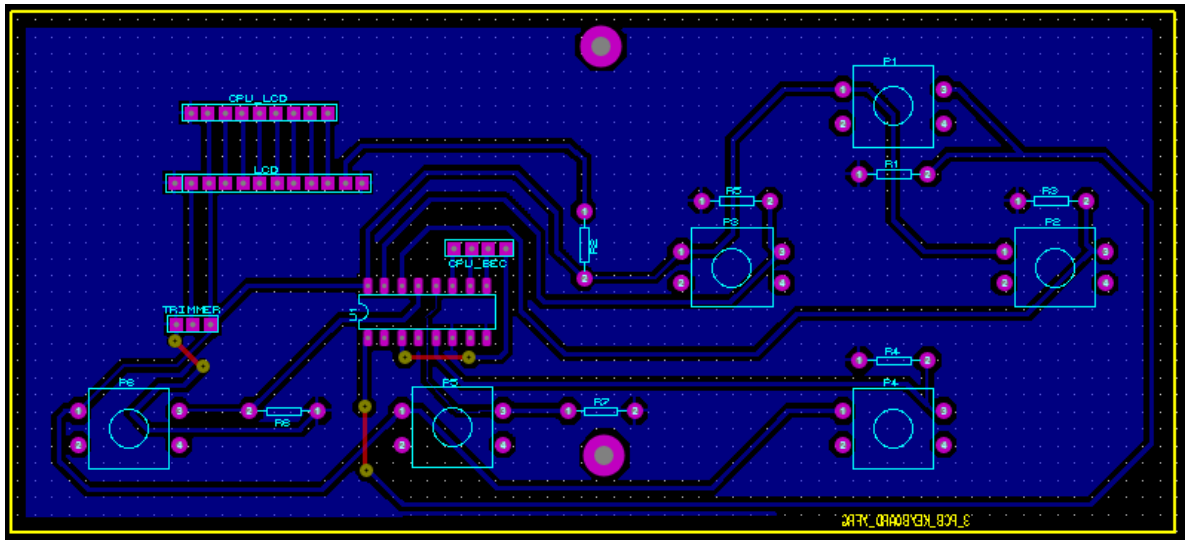
Absolute Maximum Ratings* $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Ratings	Units
V_{CB0}	Collector-Base Voltage	TIP120	60
		TIP121	80
		TIP122	100
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage	TIP120	60
		TIP121	80
		TIP122	100
V_{EB0}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C	Collector Current (DC)	5	A
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	8	A
I_B	Base Current (DC)	120	mA
P_C	Collector Dissipation ($T_A=25^\circ\text{C}$)	2	W
	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	85	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

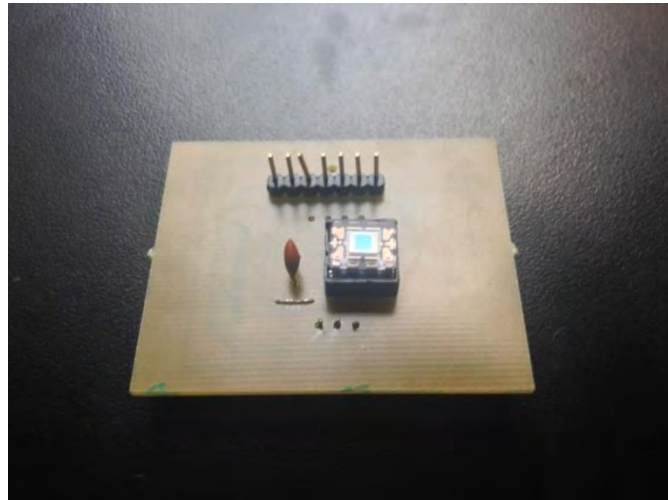
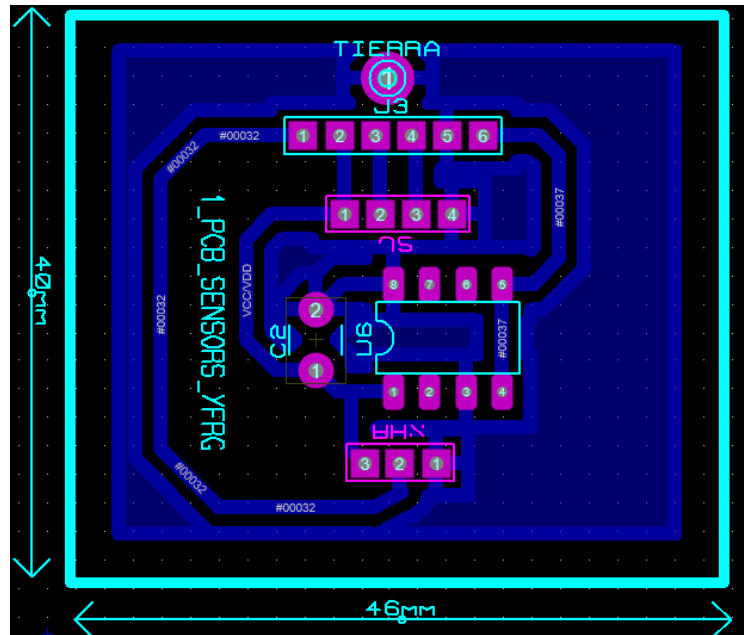
* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

TIP120/TIP121/TIP122 — NPN Epitaxial Darlington Transistor

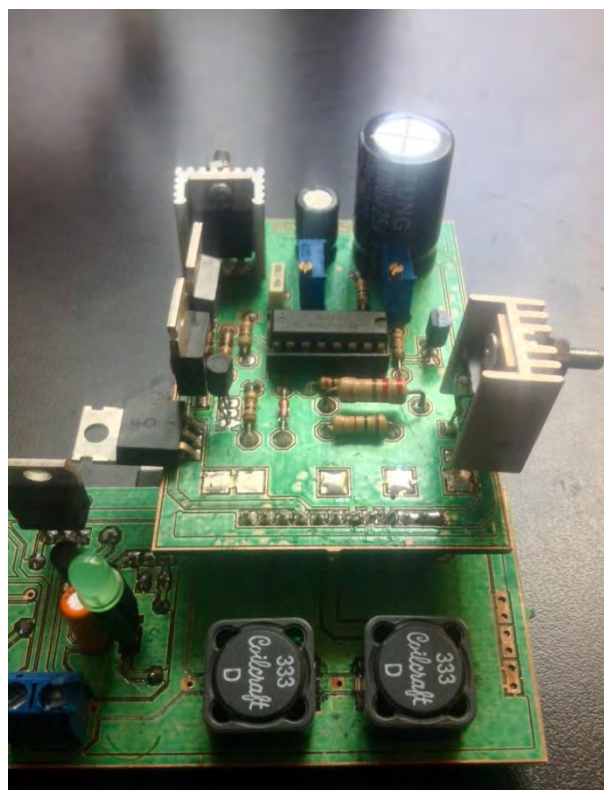
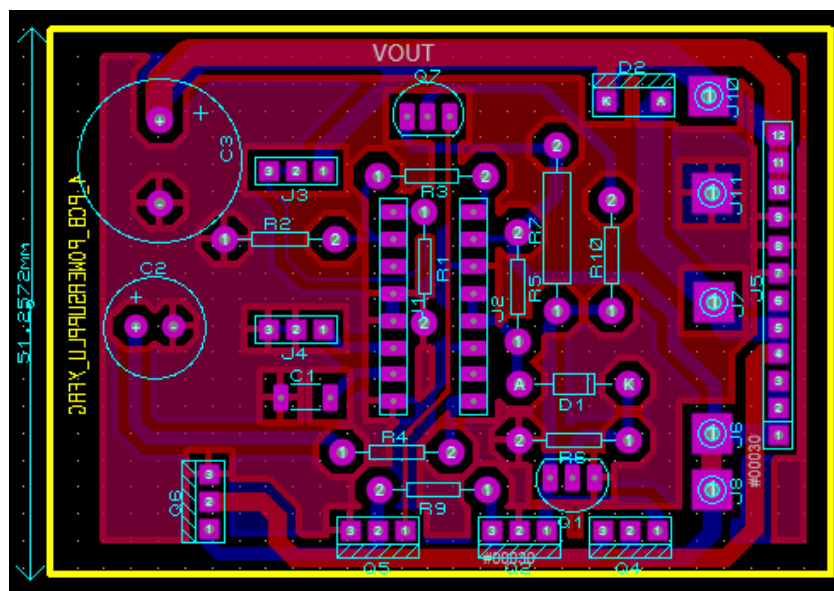
Anexo L. Tarjeta Botones y LCD



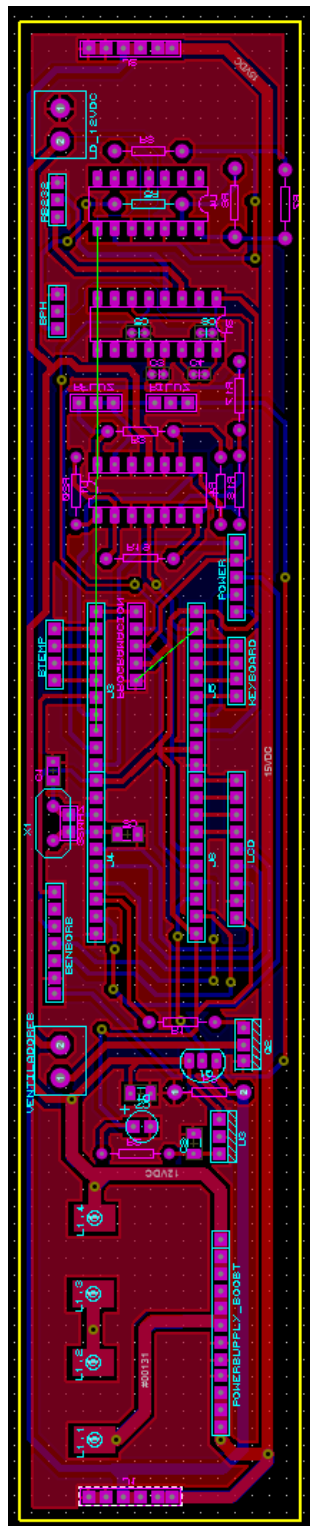
Anexo M. Tarjeta Sensores



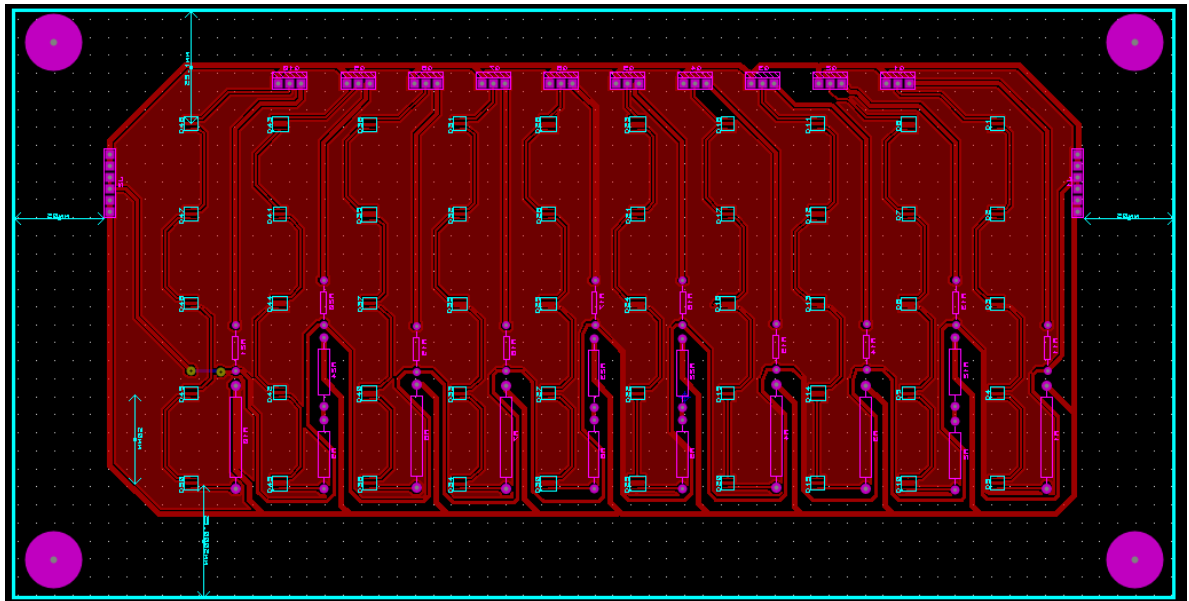
Anexo N. Tarjeta Fuente controlada



Anexo O. Tarjeta CPU



Anexo P. Tarjeta Panel LED



Anexo Q. Tarjeta cargas en AC

